

CLIMATE CHANGE

23/2017

Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger

Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2016

Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger

Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2016

von

Michael Memmler, Thomas Lauf, Katharina Wolf, Sven Schneider
Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Aktualisierte Fassung aufbauend auf den vorherigen Veröffentlichungen der
„Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger“ ((UBA, et al., 2014), (UBA, et
al., 2013), (UBA, et al., 2009))

Impressum

Herausgeber:

Umweltbundesamt

Wörlitzer Platz 1


06844 Dessau-Roßlau

Tel: +49 340-2103-0

Fax: +49 340-2103-2285

info@umweltbundesamt.de

Internet: www.umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt

Abschlussdatum:

Oktober 2017

Redaktion:

Fachgebiet I 2.5 Energieversorgung und -daten

Thomas Lauf

Publikationen als pdf:

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

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, Oktober 2017

Vorbemerkung

Dieser Bericht entstand im Rahmen der Arbeiten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) als Beitrag des Umweltbundesamtes.

Die Emissionsbilanzierung wurde nach derzeitigem Stand des Wissens durchgeführt. Eine Anpassung an neue Erkenntnisse erfolgt regelmäßig. Sachgerechte Kritik und methodische Anmerkungen sind daher ausdrücklich erwünscht.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	12
Executive Summary	14
1 Einleitung	16
2 Methodik, Datenquellen und Forschungsbedarf.....	18
2.1 Methodik.....	18
2.1.1 Betrachtete Treibhausgase und Luftschadstoffe	18
2.1.2 Vorgehen bei der Emissionsbilanzierung	19
2.1.3 Exkurs: Berücksichtigung von Landnutzungsänderungen bei biogenen Energieträgern	22
2.2 Datenquellen	23
2.2.1 Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energien von der AGEE-Stat.....	24
2.2.2 Emissionsfaktoren für die direkten Emissionen aus dem Nationalen Emissionsinventar (ZSE)	24
2.2.3 IFEU-Studie zur Aktualisierung der Eingangsdaten und Emissionsbilanzen wesentlicher biogener Energienutzungspfade (BioEm)	25
2.2.4 Ökobilanzdaten für Vorketten-Emissionsfaktoren aus GEMIS und ecoinvent	25
2.2.5 Evaluationsbericht gem. Biokraft-NachV / BioSt-NachV der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung	26
2.2.6 Substitutionsfaktoren im Stromsektor von Fraunhofer ISI	27
2.2.7 RWI/forsa-Erhebungen des Energieverbrauchs der privaten Haushalte.....	28
2.3 Unsicherheiten und Forschungsbedarf.....	28
3 Zusammenfassung der Ergebnisse	30
3.1 Emissionsbilanzen für Treibhausgase	30
3.1.1 Stromsektor.....	32
3.1.2 Wärmesektor.....	34
3.1.3 Verkehrssektor	35
3.2 Emissionsvermeidung wesentlicher Luftschadstoffe	37
3.2.1 Säurebildende Emissionen	38
3.2.2 Staubemissionen	40
4 Erneuerbare Energien im Stromsektor.....	42
4.1 Photovoltaik.....	43
4.1.1 Energiebereitstellung	44
4.1.2 Substitutionsfaktoren.....	44
4.1.3 Emissionsfaktoren	45
4.1.4 Ergebnisse der Emissionsbilanz.....	45

4.2	Windenergie an Land (onshore)	46
4.2.1	Energiebereitstellung	46
4.2.2	Substitutionsfaktoren.....	47
4.2.3	Emissionsfaktoren	48
4.2.4	Ergebnisse der Emissionsbilanz.....	49
4.3	Windenergie auf See (offshore).....	49
4.3.1	Energiebereitstellung	49
4.3.2	Substitutionsfaktoren.....	50
4.3.3	Emissionsfaktoren	50
4.3.4	Ergebnisse der Emissionsbilanz.....	51
4.4	Wasserkraft.....	51
4.4.1	Energiebereitstellung	52
4.4.2	Substitutionsfaktoren.....	52
4.4.3	Emissionsfaktoren	53
4.4.4	Ergebnisse der Emissionsbilanz.....	53
4.5	Tiefengeothermie	54
4.5.1	Energiebereitstellung	54
4.5.2	Substitutionsfaktoren.....	55
4.5.3	Emissionsfaktoren	55
4.5.4	Ergebnisse der Emissionsbilanz.....	56
4.6	Feste Biomasse	57
4.6.1	Energiebereitstellung	57
4.6.2	Substitutionsfaktoren.....	58
4.6.3	Emissionsfaktoren	58
4.6.4	Ergebnisse der Emissionsbilanz.....	61
4.7	Biogas und Biomethan	62
4.7.1	Energiebereitstellung	62
4.7.2	Substitutionsfaktoren.....	63
4.7.3	Emissionsfaktoren	63
4.7.4	Ergebnisse der Emissionsbilanz.....	66
4.8	Flüssige Biomasse (Pflanzenöl)	67
4.8.1	Energiebereitstellung	68
4.8.2	Substitutionsfaktoren.....	68
4.8.3	Emissionsfaktoren	69
4.8.4	Ergebnisse der Emissionsbilanz.....	70

4.9	Klärgas.....	71
4.9.1	Energiebereitstellung.....	71
4.9.2	Substitutionsfaktoren.....	72
4.9.3	Emissionsfaktoren.....	72
4.9.4	Ergebnisse der Emissionsbilanz.....	73
4.10	Deponiegas.....	73
4.10.1	Energiebereitstellung.....	74
4.10.2	Substitutionsfaktoren.....	74
4.10.3	Emissionsfaktoren.....	74
4.10.4	Ergebnisse der Emissionsbilanz.....	75
4.11	Biogener Anteil des Siedlungsabfalls.....	76
4.11.1	Energiebereitstellung.....	76
4.11.2	Substitutionsfaktoren.....	77
4.11.3	Emissionsfaktoren.....	77
4.11.4	Ergebnisse der Emissionsbilanz.....	78
5	Erneuerbare Energien im Wärmesektor.....	79
5.1	Feste Biomasse (private Haushalte und GHD).....	81
5.1.1	Endenergiebereitstellung.....	81
5.1.2	Substitutionsfaktoren.....	82
5.1.3	Emissionsfaktoren.....	83
5.1.4	Ergebnisse der Emissionsbilanz.....	85
5.2	Feste Biomasse (Industrie).....	86
5.2.1	Endenergiebereitstellung.....	87
5.2.2	Substitutionsfaktoren.....	87
5.2.3	Emissionsfaktoren.....	88
5.2.4	Ergebnisse der Emissionsbilanz.....	90
5.3	Feste Biomasse (Allgemeine Versorgung).....	91
5.3.1	Endenergiebereitstellung.....	91
5.3.2	Substitutionsfaktoren.....	92
5.3.3	Emissionsfaktoren.....	93
5.3.4	Ergebnisse der Emissionsbilanz.....	95
5.4	Flüssige Biomasse.....	96
5.4.1	Endenergiebereitstellung.....	96
5.4.2	Substitutionsfaktoren.....	97
5.4.3	Emissionsfaktoren.....	98

5.4.4	Ergebnisse der Emissionsbilanz.....	100
5.5	Gasförmige Biomasse (Biogas und Biomethan, Klärgas, Deponiegas)	101
5.5.1	Endenergiebereitstellung.....	102
5.5.2	Substitutionsfaktoren.....	102
5.5.3	Emissionsfaktoren	103
5.5.4	Ergebnisse der Emissionsbilanz.....	106
5.6	Biogener Anteil des Siedlungsabfalls	108
5.6.1	Endenergiebereitstellung.....	108
5.6.2	Substitutionsfaktoren.....	109
5.6.3	Emissionsfaktoren	109
5.6.4	Ergebnisse der Emissionsbilanz.....	110
5.7	Solarthermie	111
5.7.1	Endenergiebereitstellung.....	111
5.7.2	Substitutionsfaktoren.....	112
5.7.3	Emissionsfaktoren	112
5.7.4	Ergebnisse der Emissionsbilanz.....	113
5.8	Umgebungswärme: Umweltwärme und oberflächennahe Geothermie.....	114
5.8.1	Endenergiebereitstellung.....	115
5.8.2	Substitutionsfaktoren.....	115
5.8.3	Emissionsfaktoren	116
5.8.4	Ergebnisse der Emissionsbilanz.....	117
5.9	Tiefengeothermie	119
5.9.1	Endenergiebereitstellung.....	119
5.9.2	Substitutionsfaktoren.....	120
5.9.3	Emissionsfaktoren	120
5.9.4	Ergebnisse der Emissionsbilanz.....	121
6	Erneuerbare Energien im Verkehrssektor	123
6.1	Biodiesel und HVO	124
6.2	Bioethanol.....	128
6.3	Pflanzenöl	132
6.4	Biomethan.....	134
	Abbildungsverzeichnis	138
	Tabellenverzeichnis	138
	Begriffserklärungen	145
	Literaturverzeichnis	148

Abkürzungsverzeichnis

AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.
AP	Versauerungspotential (englisch: Acidification Potential); vgl. VP
BAFA	Bundesamts für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
BHKW	Blockheizkraftwerk
BioKraft-NachV	Verordnung über Anforderungen an eine nachhaltige Herstellung von Biokraftstoffen (Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung)
BioSt-NachV	Verordnung über Anforderungen an eine nachhaltige Herstellung von flüssiger Biomasse zur Stromerzeugung (Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung)
BlmSchV	Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Bundesimmissionsschutzverordnung)
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BMU / BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Reaktorsicherheit, seit 2014 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Reaktorsicherheit und Bau
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
CH₄	Methan
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO₂	Kohlenstoffdioxid
CO₂-Äq.	Kohlenstoffdioxidäquivalent, CO ₂ -Äquivalent
DEPV	Deutscher Energieholz- und Pelletverband
DLR	Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt, Institut für Technische Thermodynamik
EEG	Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz)
EEWärmeG	Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich (Erneuerbaren-Wärme-gesetz)
FAME	Fettsäuremethylester (englisch: Fatty Acid Methylester)
GEMIS	Globales Emissions-Modell integrierter Systeme (Computermodell mit integrierter Datenbank zur Lebensweg- und Ökobilanzierung und Stoffstromanalyse für Energie-, Stoff- und Verkehrssysteme)
GWP	Treibhausgaspotenzial (englisch: Global Warming Potential) ; vgl. THP
GZB	Geothermiezentrum Bochum
IFEU	Institut für Energie- und Umweltforschung
IPCC	Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen; Weltklimarat (englisch: Intergovernmental Panel on Climate Change)
Fraunhofer ISI	Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung
IWES	Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik
kWh_{el}	Kilowattstunde elektrisch
kWh_{th}	Kilowattstunde thermisch

KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LCA	Lebenszyklusanalyse (englisch: Life Cycle Assessment)
LULUCF	Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft (englisch: Land Use, Land-Use Change and Forestry)
MJ	Megajoule
N₂O	Distickstoffoxid (Lachgas)
Nabisy	Nachhaltige-Biomasse-System (Web-Anwendung der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung zum Herunterladen und Übertragen von Nachhaltigkeitsnachweisen und Nachhaltigkeits-Teilnachweisen)
ngd	Nutzungsgrad
NMVOG	Flüchtige organische Verbindungen (ohne Methan)
NO_x	Stickstoffoxide
RWI	Rheinisch-Westfälische Institut für Wirtschaftsforschung
SF	Substitutionsfaktor
SO₂	Schwefeldioxid
SO₂-Äq.	SO ₂ -Äquivalent
StrEG	Entschädigung für Strafverfolgungsmaßnahmen
TA-Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft
THP	Treibhausgaspotenzial
TREMODO	Emissionsberechnungsmodell für den Verkehr (englisch.: Traffic Emission Estimation Model)
UBA	Umweltbundesamt
UNFCCC	Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen, Klimarahmenkonvention (englisch: United Nations Framework Convention on Climate Change)
VP	Versauerungspotential
VTI	Thünen-Institut
ZSE	Zentrales System der Emissionen (detailliertes Datenbanksystem des Umweltbundesamtes zur Erstellung der Emissionsinventare)

Zusammenfassung

Das Umweltbundesamt (UBA) erstellt im Rahmen der Arbeiten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) eine Emissionsbilanz der erneuerbaren Energien für die Sektoren Strom, Wärme und Verkehr. Ursprünglich wurde dies im Auftrag des damaligen Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) durchgeführt. Mit dem Wechsel der Zuständigkeiten für den Bereich der erneuerbaren Energien zum Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) erfolgt die Emissionsbilanzierung seit dem Jahr 2014 im Auftrag des BMWi.

Die Ergebnisse der Emissionsbilanz werden jährlich im September in der Publikationsreihe „Erneuerbare Energien in Zahlen - Nationale und internationale Entwicklung“ (BMWi, 2017) veröffentlicht. Zusätzlich erfolgen zum jeweiligen Jahresbeginn im Februar/März eine erste Schätzung zur Bilanzierung des vergangenen Jahres sowie eine Datenaktualisierung zum Jahresende. Die jeweils aktuellen Daten sowie die zugehörigen Publikationen sind auf den Internetseiten des Umweltbundesamtes¹ bzw. des BMWi² abrufbar. Darüber hinaus gehen die Ergebnisse in den nationalen Monitoring-Bericht mit ein (BMWi, 2016b).

In den letzten Jahren wurde die Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger kontinuierlich weiterentwickelt. Der vorliegende Bericht beschreibt die grundlegenden Methoden der Bilanzierung und ist eine aktualisierte Fassung der unter dem Titel „Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger - Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2013“ (CLIMATE CHANGE 29/2014) veröffentlichten Publikation. Er gibt die neuste Datenlage für den Strom-, Wärme- und Verkehrssektor, sowie aktualisierte Ergebnisse der Emissionsbilanzierung erneuerbarer Energieträger wieder.

Grundlage und Rahmen der Berechnung bildet die Richtlinie 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen. Darüber hinaus wurden aktuelle Forschungsergebnisse berücksichtigt, so z. B. die Emissionsfaktoren des Forschungsvorhabens „Aktualisierung von Ökobilanzdaten für Erneuerbare Energien im Bereich Treibhausgase und Luftschadstoffe“ (Rausch & Fritsche, 2012) des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Ferner wurden fehlende Angaben zu den Emissionen einzelner Treibhausgase und Luftschadstoffe für wesentliche Biokraftstoff-Herstellungswege mittels des Gutachtens „Aktualisierung der Eingangsdaten und Emissionsbilanzen wesentlicher biogener Energienutzungspfade (BioEm)“ des Instituts für Energie- und Umweltforschung (IFEU, 2016) ergänzt. Zusätzlich fließen die ermittelten Substitutionsbeziehungen des Gutachtens „CO₂-Minderung im Stromsektor durch den Einsatz erneuerbarer Energien im Jahr 2012 und 2013“ des Fraunhofer Instituts für System- und Innovationsforschung (ISI, 2016) in die Bilanzierung mit ein.

Die zur Ableitung von Substitutions- und Emissionsfaktoren verwendeten Datenquellen werden in den einzelnen Kapiteln dokumentiert. Große Bedeutung kommt dabei insbesondere der UBA-Datenbank Zentrales System Emissionen (ZSE) zur nationalen Emissionsberichterstattung sowie mehreren Ökobilanzdatenbanken wie dem Globalen Emissions-Modell integrierter Systeme (GEMIS) zu.

Die in diesem Bericht aufgeführten Ergebnisse für das Jahr 2016 zeigen, dass der Ausbau erneuerbarer Energien wesentlich zur Erreichung der Klimaschutzziele in Deutschland beiträgt. Insgesamt werden in allen Verbrauchssektoren fossile Energieträger zunehmend durch erneuerbare Energien ersetzt und damit dauerhaft Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen vermieden. Die Ergebnisse zeigen

¹ <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen/arbeitsgruppe-erneuerbare-energien-statistik>

² http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/erneuerbare_energien_in_zahlen.html

darüber hinaus, dass eine differenzierte Betrachtung verschiedener Technologien und Sektoren sinnvoll und notwendig ist, wenn es z.B. darum geht, gezielte Maßnahmen zum Klimaschutz und der Luftreinhaltung abzuleiten, da sich die spezifischen Vermeidungsfaktoren für die untersuchten Treibhausgase und Luftschadstoffe teilweise erheblich unterscheiden.

Im Ergebnis weist die Netto-Emissionsbilanz der erneuerbaren Energien unter Berücksichtigung der Vorketten eine Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Höhe von rund 160 Mio. t CO₂-Äquivalente (CO₂-Äq.) im Jahr 2016 aus. Auf den Stromsektor entfielen 119 Mio. t CO₂-Äq., davon sind 100 Mio. t der Strommenge mit EEG-Vergütungsanspruch zuzuordnen. Im Wärmesektor wurden 35 Mio. t und durch biogene Kraftstoffe 6 Mio. t CO₂-Äq. vermieden.

Generell lässt sich feststellen, dass bei Strom und Wärme das Ergebnis maßgeblich dadurch beeinflusst wird, welche fossilen Brennstoffe durch erneuerbare Energieträger ersetzt werden. Bei den Biokraftstoffen sind insbesondere die Art und Herkunft der verwendeten Rohstoffe ausschlaggebend. Sofern es sich dabei nicht um biogene Reststoffe oder Abfälle handelt, sind Landnutzungsänderungen durch den landwirtschaftlichen Anbau der Energiepflanzen zu beachten.

Eine zusammenfassende Beschreibung der Ergebnisse für die untersuchten Sektoren erfolgt im Ergebniskapitel dieses Berichts. Die detaillierten Auswertungen zu den Emissionsbilanzen der untersuchten Technologien und Energieträgern werden in den einzelnen Kapiteln zum Strom-, Wärme- und Verkehrssektor dargestellt.

Executive Summary

For several years the Federal Environment Agency (UBA) has been compiling a balance of emissions avoided by renewable energy sources - primarily on behalf of the former Federal Ministry for the Environment, Nature conservation and Nuclear Safety (BMU). In 2014 the work was taken over by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi) in line with the restructuring of responsibilities for energy policy within the Federal government.

The results of the net balance of avoided emissions is made available within the publication "Renewable Energy Sources in Figures - National and international developments" (BMWi, 2017), which is presented annually in September. Additionally a first estimation of the balance for the previous year is made at February / March and at the end of the year the results are finally updated. Latest data and the above mentioned publication can be downloaded from the webpage of UBA³ and BMWi⁴.

During the last years, the net balance of emissions avoided by renewable energy sources has been continuously improved. The current edition represents a revised version of the last report, published under the title „Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger - Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2013" (CLIMATE CHANGE 29/2014). It contains updated data for the electricity, heat and transport sector based on the latest renewable energy statistics for the year 2016.

Basis and general framework for calculations is the Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the European Council of 23 April 2009 "on the promotion of the use of energy from renewable sources". Additionally, up-to-date research is fed into the calculations. Examples include the use of representative emission factors derived from a research project on „Updating of Eco-balances for greenhouse gases and air pollutants from renewable energy sources" (Rausch & Fritsche, 2012), financed by the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU). Data gaps on biofuel production pathways have been filled through a study on the "Update of the input data and emissions balances of selected biofuel resource pathways" of the Institute for Energy and Environmental Research (IFEU, 2016). Furthermore the recent study on "CO₂-reductions in the electricity sector through the use of renewable energies in 2012 and 2013" Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research (ISI, 2016) was implemented.

Substitution and emission factors used in the report are derived from a number of sources including the UBA database for national emissions reporting (Central System of Emissions), as well as several life-cycle databases like the Global Emissions Model for integrated Systems (GEMIS).

The reported results for the year 2016 show that the expansion of renewable energies substantially contributes to the achievement of national climate goals in Germany. In all consumption sectors (i.e. power, heat and transport) fossil fuels are being replaced by renewable energies, thereby permanently avoiding energy related greenhouse gas emissions and air pollutants. Nevertheless, the results also illustrate that different sectors and renewable energy technologies show very different reduction factors for the investigated greenhouse gases and air pollutants, which is of key importance in order to derive specific and efficient climate change mitigation actions.

Considering all relevant upstream chains and the relevant greenhouse gases carbon dioxide, methane and nitrous oxide, the net balance of emissions avoided resulted in 160 Mio. t CO₂ equivalents (CO₂-

³ <https://www.umweltbundesamt.de/en/topics/climate-energy/renewable-energies/renewable-energies-the-figures>

⁴ http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/erneuerbare_energien_in_zahlen.html

eq.) in 2016. Of this total amount, the power sector accounts for 119 Mio. t CO₂-eq. (with 100 Mio. t being entitled for remuneration under the Renewable Energy Sources Act). In the heat and transport sector avoided emissions amounted to 35 Mio. t and 6 Mio. t CO₂-eq. respectively.

It can be generally stated that for the results in the power and heat sector the type of fossil fuel substituted by renewable energy sources is of greatest importance for the amount of emissions reduced. For biofuels on the other hand, type and origin of the utilized raw materials determine the potential of emission reductions. Additionally, in the case of bio-energies (with the exception of biogenic waste and residues) land use changes through the cultivation of energy plants have to be considered as a major source of potential emissions. Although these indirect emissions can substantially influence results, they are not yet part of the underlying report as no officially approved methodology to account for such emissions exists.

A summarizing set of results for the different sectors is available in the results sections of this report. It is followed by a detailed and transparent presentation of all investigated renewable energy technologies in the electricity, heat and transport sectors.

1 Einleitung

In den letzten 10 Jahren verlief der Ausbau erneuerbarer Energien in Deutschland dynamisch. Bezogen auf den gesamten Brutto-Endenergieverbrauch stieg deren Anteil von 7,7 Prozent im Jahr 2006 auf 14,7 Prozent im Jahr 2016 (2015: 14,6 Prozent). Dabei ist der Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch zuletzt nur noch leicht gestiegen - auf insgesamt 31,7 Prozent (2015: 31,5 Prozent), während die Anteile in den Sektoren Wärme (13 Prozent) und Verkehr (5,2 Prozent) gegenüber dem Jahr 2015 sogar im Fall stagnierten bzw. leicht (um - 0,1 Prozent) rückläufig waren (vgl. (BMW, 2017) und (AGEE-Stat, 2017)).

Mit dem Energiekonzept vom September 2010 (Bundesregierung, 2010) und den energiepolitischen Beschlüssen vom Juni 2011 (Bundesregierung, 2011) hat die Bundesregierung den Umbau der Energieversorgung hin zu einem erneuerbaren Energiesystem eingeleitet. Die bis in das Jahr 2050 reichende Gesamtstrategie beinhaltet neben Zielen zur Energieeinsparung u. a. die in Tabelle 1 aufgezeigten Ziele im Bereich erneuerbarer Energien (BMW, 2016b).

Tabelle 1: Ziele der Bundesregierung zum Ausbau der erneuerbaren Energien

Erneuerbare Energien	2020	2025	2030	2040	2050
Anteil am Bruttostromverbrauch	mind. 35%	40-45 %	mind. 50 %	mind. 65 %	mind. 80 %
Anteil am Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte	14 %				
Anteil am Endenergieverbrauch im Verkehr nach RL 2009/28/EG	10 %				
Anteil am gesamten Bruttoendenergieverbrauch nach RL 2009/28/EG	18 %		30 %	45 %	60 %

Quelle: Eigene Darstellung nach (BMW, 2016b), (EEWärmeG, 2008), (Richtlinie 2009/28/EG, 2009)

Um diese Ziele für Deutschland zu erreichen, sind folgende Einzelmaßnahmen vorgesehen:

Der Anteil der erneuerbaren Energien am deutschen Bruttostromverbrauch soll auf 40-45 Prozent bis zum Jahr 2025 ansteigen. Hierfür wurde das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) im Sommer 2014 novelliert. Die Gründe dafür waren insbesondere, eine optimalere Steuerung des weiteren Ausbaus erneuerbarer Energien, sowie die Differenzkosten durch Konzentration auf günstige Technologien zu senken und insbesondere durch den Einbezug der Eigenversorgung besser zu verteilen. Zudem sollte die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien durch eine verpflichtende Direktvermarktung besser in den Markt integriert werden (BMW, 2014a). Seit der EEG Novellierung zum 01.01.2017 wird die Höhe der Vergütung für Strom aus erneuerbaren Energien nicht wie bisher staatlich festgelegt, sondern durch Ausschreibungen ermittelt. Dies hat für die Ergebnisse der vorliegenden Emissionsbilanz noch keine Auswirkungen.

Der Anteil erneuerbarer Energien an der Wärmebereitstellung ist in den letzten Jahren langsamer als der erneuerbare Anteil im Strombereich gewachsen. Die Technologien sind bereits vorhanden, haben den Markt bisher aber noch nicht ausreichend durchdrungen. Vorrangiges Ziel des Erneuerbaren-Energien-Wärmegesetzes (EEWärmeG, 2008) ist es, den Anteil erneuerbarer Energien am Wärmeverbrauch in Deutschland bis zum Jahr 2020 auf 14 Prozent zu erhöhen. Das Gesetz verpflichtet jeden Eigentümer eines neuen Gebäudes, seinen Wärmeenergiebedarf anteilig mit erneuerbaren Energien zu

decken. Um die Gebäudeeigentümer bei der Nutzung erneuerbarer Energien auch finanziell zu unterstützen, sieht das EEWärmeG Fördermöglichkeiten über das Marktanzreizprogramm für erneuerbare Energien vor.

Im Verkehrsbereich wurde mit der EU-Richtlinie zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (Richtlinie 2009/28/EG) ein für alle Mitgliedsstaaten verbindliches Ziel eines 10 Prozent-Anteils erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch im Verkehr für das Jahr 2020 festgelegt. In diesem Zusammenhang verfolgt die Bundesregierung das Ziel, den Anteil der Biokraftstoffe bis zum Jahr 2020 soweit zu erhöhen, dass dadurch die Treibhausgasemissionen um 6 Prozent gegenüber dem Einsatz fossiler Kraftstoffe reduziert werden (Nationaler Biomasseaktionsplan (BMEL, BMU, 2009). Konkret wird der Anteil nach dem Gesetz zur Änderung der Förderung von Biokraftstoffen, das am 21. Juli 2009 in Kraft trat, ab dem Jahr 2015 als Netto-Klimaschutzbeitrag (Dekarbonisierung) in einer Höhe festgelegt, dass die Treibhausgasemissionen ab dem Jahr 2015 um 3 Prozent, ab 2017 um 4 Prozent und ab dem Jahr 2020 um 6 Prozent gesenkt werden (Bundesregierung, 2014). Die Richtlinie 2009/28/EG definiert darüber hinaus Nachhaltigkeitskriterien für Biokraftstoffe und flüssige Brennstoffe. Diese umfassen Mindestanforderungen an eine nachhaltige Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Flächen, den Schutz natürlicher Lebensräume und eine Minderung der Treibhausgasemissionen gegenüber der Nutzung konventioneller Kraftstoffe.

Zur Umsetzung der Nachhaltigkeitskriterien in deutsches Recht wurden zwei Nachhaltigkeitsverordnungen erlassen (Biokraft-NachV und BioSt-NachV). Die Debatte um die Umweltwirkungen der Biokraftstofferzeugung zeigt exemplarisch auf, dass der Ausbau erneuerbarer Energien je nach gewähltem Nutzungspfad auch zu negativen Folgewirkungen führen kann. Um Fehlentwicklungen rechtzeitig erkennen zu können, sind daher umfassende ökobilanzielle Analysen der über den gesamten Lebensweg eines Energieträgers auftretenden Umweltauswirkungen unerlässlich (WBGU, 2008).

Gleichwohl ist vor dem Hintergrund der Jahrhundertaufgabe Klimaschutz der Beitrag der erneuerbaren Energien zur Vermeidung von klima- und umweltrelevanten atmosphärischen Emissionen insgesamt unumstritten – die Energiebereitstellung auf Basis von Anbaubiomasse durch teilweise einhergehende Landnutzungsänderungen ggf. ausgenommen. In Diskussion steht vielmehr die Höhe der vermiedenen Emissionen. Die vorliegende Netto-Bilanz berücksichtigt dabei sowohl die Emissionen an Treibhausgasen und Luftschadstoffen, die durch die Substitution fossiler Energiebereitstellung vermieden werden, als auch die Emissionen, die durch den Einsatz erneuerbarer Energien verursacht werden.

In den folgenden Kapiteln werden die Methoden, die herangezogenen Datenquellen sowie die Ergebnisse der Emissionsbilanz für die erneuerbaren Energien im Jahr 2016 vorgestellt.

2 Methodik, Datenquellen und Forschungsbedarf

2.1 Methodik

Im Rahmen dieses Berichts wird die Freisetzung von ausgewählten Treibhausgasen und Luftschadstoffen bilanziert, die durch die Nutzung erneuerbaren Energien verursacht bzw. durch die Substitution entsprechender fossiler Energien vermieden werden.

In Anlehnung an die methodischen Grundsätze der Lebenszyklusanalyse (Klöpper & Grahl, 2009), werden dabei sowohl die direkten Emissionen berücksichtigt, die im Zuge der Umwandlung von Primärenergieträgern z. B. bei der Verbrennung fossiler oder biogener Brennstoffe verursacht werden, als auch die indirekten Emissionen, die außerhalb der Umwandlungsprozesse in den sog. Vorketten z. B. bei der Herstellung von Anlagen zur Energieumwandlung oder der Gewinnung und Bereitstellung von Primär- und Sekundärenergieträgern entstehen. Dazu zählen auch Emissionen aus fremdbezogener Hilfsenergie, die unmittelbar mit dem Erzeugungspfad in Verbindung stehen.

Als Ergebnis wird eine Netto-Bilanz ausgewiesen, in der die im Zuge der Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energien verursachten Emissionen mit den substituierten und somit vermiedenen Emissionen aus fossiler Energiebereitstellung verrechnet werden.

2.1.1 Betrachtete Treibhausgase und Luftschadstoffe

Aufgrund der unterschiedlichen Relevanz und insbesondere der teilweise unzureichenden Datenlage liegt der Fokus in der vorliegenden Emissionsbilanz auf den in der folgenden Tabelle 2 aufgeführten Treibhausgasen und Luftschadstoffen.

Die betrachteten acht Schadstoffe bzw. Schadstoffsummen bilden eine „Kernliste an Umweltindikatoren“ ab, mit denen die Auswirkungen des Ausbaus erneuerbarer Energien auf Klimawandel und Luftqualität belastbar dargestellt werden können. Darüber hinaus bestehen für diese Schadstoffe nationale und internationale Minderungsziele und entsprechende Berichtspflichten nach der Klimarahmenkonvention in Verbindung mit dem Kyoto-Protokoll und der Genfer Luftreinhaltekonvention sowie den entsprechenden Richtlinien und Verordnungen der EU.

Tabelle 2: Übersicht der betrachteten Treibhausgase und Luftschadstoffe

Kategorie	Name	Kurzbezeichnung	Relatives Treibhausgas- bzw. Versauerungspotenzial	
Treibhausgase	Kohlenstoffdioxid	CO ₂	1	CO ₂ -Äq.
	Methan	CH ₄	25	
	Distickstoffoxid (Lachgas)	N ₂ O	298	
säurebildende Schadstoffe	Schwefeldioxid	SO ₂	1	SO ₂ -Äq.
	Stickstoffoxide	NO _x	0,696	
weitere Luftschadstoffe	Staub	-	-	-
	Kohlenstoffmonoxid	CO	-	
	Flüchtige organische Verbindungen (ohne Methan)	NMVOC	-	

Quelle: Eigene Darstellung

Eine Erweiterung der betrachteten Schadstoffe - zum Beispiel um NH_3 oder fluorierte Treibhausgase sowie eine weitere Differenzierung der Staubemissionen nach Partikelgrößen (PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$) - setzt eine erhebliche Verbesserung der ökobilanziellen Datengrundlagen voraus.

Die verschiedenen betrachteten Treibhausgase und Säurebildner tragen in unterschiedlicher Weise zur Erderwärmung bzw. Versauerung bei. Um die Wirkung der einzelnen Gase vergleichen zu können, wird ihnen ein Faktor - das relative Treibhausgaspotenzial (THP) bzw. Versauerungspotenzial (VP) - zugeordnet, das sich auf die Referenzsubstanzen Kohlenstoffdioxid (CO_2) bzw. Schwefeldioxid (SO_2) bezieht. Das Treibhausgas- bzw. Versauerungspotenzial gibt an, welche Menge an CO_2 bzw. SO_2 in einem Betrachtungszeitraum von 100 Jahren die gleiche Treibhaus- bzw. Versauerungswirkung entfalten würde wie das betrachtete Referenzgas. Die Emissionsangaben für die einzelnen Gase können nach Multiplizieren mit dem jeweiligen Äquivalenz-Faktor aufaddiert werden, so dass die Summe der Treibhausgase als CO_2 -Äquivalent ausgewiesen werden kann. Analog dazu wird das Versauerungspotenzial von SO_2 und NO_x bestimmt, welches als SO_2 -Äquivalent angegeben wird.

In der vorliegenden Aktualisierung der Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger erfolgte – korrespondierend zur internationalen Treibhausgasberichterstattung nach der Klimarahmenkonvention (UNFCCC) - für den Strom- und Wärmesektor eine Umstellung der Berechnungen auf das THP gemäß des vierten Sachstandberichts des *Weltklimarats* (IPCC) - aus dem Jahr 2007 (IPCC, 2007). Das THP von Methan (CH_4) beträgt – wie bereits vorher im Verkehrsbereich zugrunde gelegt - nunmehr 25 und nicht mehr 21 und das von Lachgas (N_2O) verringert sich von 310 auf 298. Aufgrund der vergleichsweise geringen Bedeutung dieser beiden Treibhausgase sowie der gegenläufigen Tendenz verändert dies die insgesamt vermiedenen Treibhausgasemissionen jedoch nur geringfügig.

2.1.2 Vorgehen bei der Emissionsbilanzierung

Das grundlegende methodische Vorgehen zur Ermittlung der Emissionsvermeidung, die aus der Nutzung der erneuerbaren Energien resultiert, wird im Folgenden beschrieben. Im Vergleich zu der vorigen Veröffentlichung der Emissionsbilanz ergeben sich dabei einige methodische Erweiterungen (UBA, et al., 2014).

Die Emissionsfaktoren werden jeweils nach ihrer Entstehungsart aufgegliedert, sodass Emissionsfaktoren für die Vorketten, Emissionsfaktoren für die direkten Emissionen und Emissionsfaktoren für die fremdbezogene Hilfsenergie ausgewiesen werden. Letztere wurden früher zur Vereinfachung den Vorketten zugerechnet. Sie leiten sich aus der Menge der benötigten fremdbezogenen Hilfsenergie, welche anschließend mit den Emissionsfaktoren des deutschen Strommix verrechnet werden, ab.

Darüber hinaus werden Nutzungsgrade in Abhängigkeit von der angewendeten Technologie, der Zuordnung zu immissionsschutzrechtlichen Verordnungen und des verwendeten Energieträgers berücksichtigt. Bei Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK-Anlagen) handelt es sich dabei um allozierte Nutzungsgrade auf Basis der Finnischen Methode. Bei der Finnischen Methode wird zunächst die Primärenergieeinsparung durch die KWK-Nutzung berechnet. Dazu werden Referenzwirkungsgrade der getrennten Erzeugung von Strom (40 Prozent) und Wärme (80 Prozent) in Anlehnung an die Energieeffizienz-Richtlinie 2012/27/EU vorgegeben. Anschließend wird mittels des Brennstoffeinsatzes der Erzeugung und der zugeordneten Primärenergieeinsparung ein entsprechender Nutzungsgrad ermittelt.

Diese Erweiterungen erhöhen die Transparenz der Bilanzierung und ermöglichen eine Emissions-Zuordnung auf die jeweilige Lebenszyklusphase. Die Datenquellen zu den aufgeführten Parametern werden im Kapitel 2.2 näher erläutert.

Durch die Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energien werden konventionelle Energieträger substituiert und dadurch Emissionen brutto vermieden ($E_{v,brutto}$). Die sog. Substitutionsfaktoren (SF) geben dabei die jeweiligen Anteile der konventionellen Energieträger (z. B. Öl, Gas, Braun- und Steinkohle, Kernbrennstoff) an, die durch die Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energien verdrängt

werden. Bei der Bereitstellung von Strom ist hierbei die Stromerzeugung (SE_{ern}) und in den Sektoren Wärme und Verkehr der Endenergieverbrauch (EEV_{ern}) maßgeblich. Durch Multiplikation der substituierten Anteile an fossilen/nuklearen Energieträgern (SF) mit deren entsprechenden Emissionsfaktoren und der Division mit den jeweiligen fossilen Nutzungsgraden (ngd_{fossil}), ergibt sich in Summe der für die einzelnen erneuerbaren Energien spezifische Brutto-Vermeidungsfaktor.

Dabei werden die fossilen Emissionsfaktoren anders als bei den erneuerbaren Emissionsfaktoren nur nach direkt verursachten Emissionen ($EF_{fossil,Direkt}$) und Emissionen aus den Vorketten zuzüglich der verwendeten Hilfsenergie ($EF_{fossil,Vorkette+Hilfsenergie}$) aufgeschlüsselt. Multipliziert man anschließend den spezifischen Brutto-Vermeidungsfaktor (VF_{brutto}) mit der jeweiligen erneuerbaren Energiebereitstellung, ergeben sich die absoluten, brutto vermiedenen Emissionen für den Stromsektor:

$$E_{v,brutto}[t] = SE_{ern} [GWh] * \sum SF [\%] * \frac{EF_{fossil,Direkte} \left[\frac{g}{kWh} \right] + EF_{fossil,Vorkette,Hilfs.} \left[\frac{g}{kWh} \right]}{ngd_{fossil} [\%]}$$

Im Falle des Wärme- und Verkehrssektors muss vor der Berechnung der brutto vermiedenen Emissionen der bereitgestellte Endenergieverbrauch anhand des spezifischen Nutzungsgrads des jeweiligen Erzeugungspfades in Nutzenergie umgerechnet werden:

$$E_{v,brutto}[t] = EEV_{ern_m} [GWh] * ngd_{ern} [\%] * \sum SF_m [\%] * \frac{EF_{fossil,direkt} \left[\frac{g}{kWh} \right] + EF_{fossil,Vorkette,Hilfs.} \left[\frac{g}{kWh} \right]}{ngd_{fossil} [\%]}$$

Durch die Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energien werden jedoch auch Emissionen verursacht (E_u), die sich durch Multiplikation mit dem jeweiligen erneuerbaren Emissionsfaktoren, sowie der Division mit dem dazugehörigen Nutzungsgrad des verwendeten Nutzungspfades (ngd_{ern}) für den Stromsektor ergeben:

$$E_u[t] = SE_{ern} [GWh] * \frac{EF_{ernVorkette} \left[\frac{g}{kWh} \right] + EF_{ern,direkt} \left[\frac{g}{kWh} \right] + EF_{ernHilfs.} \left[\frac{g}{kWh} \right]}{ngd_{ern} [\%]}$$

Da im Wärme- und Verkehrssektor der Endenergieverbrauch maßgeblich ist, ergeben sich die verursachten Emissionen in diesen Fällen durch eine reine Multiplikation der aufsummierten erneuerbaren Emissionsfaktoren des jeweiligen Erzeugungspfades mit der entsprechenden Energiebereitstellung:

$$E_u[t] = EEV_{ern} [GWh] * (EF_{ernVorkette} \left[\frac{g}{kWh} \right] + EF_{ern,direkt} \left[\frac{g}{kWh} \right] + EF_{ernHilfs.} \left[\frac{g}{kWh} \right])$$

Auch bei der Ermittlung der verursachten Emissionen wird zwischen Emissionen aus der Vorkette ($E_{F_{ern,Vorkette}}$), direkten Emissionen ($EF_{ern,Direkt}$) und Emissionen aus der Bereitstellung von fremdbezogener Hilfsenergie ($EF_{ern,Hilfs.}$) unterschieden. Die Aufteilung der Emissionsfaktoren sowohl bei der Berechnung der vermiedenen Emissionen als auch bei der Berechnung der verursachten Emissionen ermöglicht die spätere Trennung nach der Entstehung der Emissionen im Verlauf der Bilanzierung.

In der Gesamtbilanz werden die brutto vermiedenen ($E_{v,brutto}$) sowie die verursachten Emissionen (E_u) miteinander verrechnet, woraus sich im Endergebnis die netto vermiedenen Emissionen ($E_{v,netto}$) ergeben:

$$E_{v,netto} [t] = E_{v,brutto} [t] - E_u [t]$$

In der Gesamtbilanz der netto vermiedenen Emissionen treten vor allem positive Ergebnisse auf. In diesem Fall sind die brutto vermiedenen Emissionen, die aus der Nutzung erneuerbarer Energien resultieren, größer als die dadurch verursachten Emissionen. Dementsprechend hat der Einsatz erneuerbarer Energien eine Entlastungswirkung auf die Umwelt. Negative Ergebnisse zeigen auf, dass eine Nutzung erneuerbarer Energien zu mehr Emissionen führt, als durch die Substitution konventioneller Energieträger vermieden werden.

Der spezifische Netto-Vermeidungsfaktor (VF_{netto}) ergibt sich aus der Division der in der Gesamtbilanz errechneten netto vermiedenen Emissionen durch die aus erneuerbaren Energien bereitgestellte Endenergie:

$$VF_{\text{netto}} \left[\frac{\text{g}}{\text{kWh}} \right] = \frac{E_{v,\text{netto}} [\text{t}]}{EEB_{\text{ern}} [\text{GWh}]}$$

Die genannten Eingangsparameter sind folgendermaßen charakterisiert:

- ▶ Die **Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energien** ist der Basisparameter der Emissionsbilanz. Die Daten werden von der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) übernommen (vgl. Kapitel 2.2.1). Hierbei wird zwischen Bruttostromerzeugung (BSE_{ern}) im Sektor Strom und Endenergieverbrauch (EEB_{ern}) in den Sektoren Wärme und Verkehr unterschieden. Vor allem bei der Bioenergie erfolgt jedoch vielfach eine weitergehende Differenzierung nach Brennstoffen und/oder Anlagentypen, um das häufig sehr unterschiedliche Emissionsverhalten adäquat abzubilden.
- ▶ Die **Emissionsfaktoren** (EF) für die fossilen und erneuerbaren Energieträger fassen die Gesamtemissionen über die jeweilige Energiebereitstellungskette zusammen. Neben den direkten Emissionen (EF_{Direkte}) aus dem Anlagenbetrieb beinhalten sie auch die indirekten (Vorketten-) Emissionen, d. h. alle relevanten Emissionen von der Gewinnung, der Aufbereitung und dem Transport der Brennstoffe über die Herstellung der Anlagen (EF_{Vorkette}) bis zum Einsatz von fremdbezogener Hilfsenergie ($EF_{\text{Hilfs.}}$) im Anlagenbetrieb. Hervorzuheben ist, dass die konservativ gewählten Emissionsfaktoren weder reale Einzelanlagen noch den gegenwärtig besten Stand der Technik repräsentieren, sondern den durchschnittlichen Anlagenbestand in Deutschland repräsentieren. Die Daten werden aus dem Nationalen Emissionsinventar (ZSE), verschiedenen Ökobilanzdatenbanken (Gemis) der Richtlinie 2009/28/EG sowie aus dem IFEU-Gutachten zur „Aktualisierung der Eingangsdaten und Emissionsbilanzen wesentlicher biogener Energienutzungspfade (BioEm)“ (IFEU, 2016) übernommen (vgl. Kapitel 2.2.2-2.2.4). Im Falle der Emissionsfaktoren zur fremdbezogenen Hilfsenergie findet eine Schätzung u. a. auf Basis der amtlichen Statistik (Destatis, 2016) statt. Bei den Biokraftstoffen werden die Emissionsfaktoren maßgeblich durch die in der Herstellung verwendeten Rohstoffe bestimmt, deren Anteile aus dem Evaluationsbericht gem. Biokraft-NachV/BioSt-NachV der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung abgeleitet werden (vgl. Kapitel 2.2.5).
- ▶ Die **Substitutionsfaktoren** (SF) geben darüber Auskunft, welcher Mix an fossilen Energieträgern durch die Nutzung erneuerbarer Energieträger ersetzt wird. Sie werden aus aktuellen Untersuchungen und Forschungsvorhaben zu erneuerbaren Energien im Strom- und Wärmesektor abgeleitet (vgl. Kapitel 2.2.6 und 2.2.7).
- ▶ Die **Nutzungsgrade** (ngd) der Energieträger bzw. Erzeugungspfade geben darüber Auskunft, wieviel Energie beim Umwandlungsprozess von Primär- zu Nutzenergie verloren geht. Sie werden aus aktuellen Untersuchungen, amtlichen Erhebungen und Expertenschätzungen zu erneuerbaren

Energien im Strom- und Wärmesektor abgeleitet. Bei KWK-Anlagen handelt es sich dabei um allozierte Nutzungsgrade auf Basis der Finnischen Methode.

2.1.3 Exkurs: Berücksichtigung von Landnutzungsänderungen bei biogenen Energieträgern

Sofern es sich bei der Biomassenutzung nicht um biogene Reststoffe und Abfälle handelt, sind bei der Emissionsbilanzierung Landnutzungsänderungen durch den Energiepflanzenanbau zu beachten. Sie können die Bilanzergebnisse maßgeblich beeinflussen. Hier ist jedoch zwischen direkten und indirekten Landnutzungsänderungen zu unterscheiden.

Direkte Landnutzungsänderungen im Kontext der Nutzung von Biokraftstoffen und flüssigen Biobrennstoffen dürften aufgrund der Vorgaben der „Verordnung über Anforderungen an eine nachhaltige Herstellung von Biokraftstoffen“ (Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung - Biokraft-NachV) und der „Verordnung über Anforderungen an eine nachhaltige Herstellung von flüssiger Biomasse zur Stromerzeugung“ (Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung - BioSt-NachV) nur noch eine sehr begrenzte Rolle spielen. Andernfalls wird da das erforderliche Treibhausgasminderungsziel sonst kaum erreicht bzw. die darauf basierenden Biokraftstoffe wären mit der Umstellung auf die THG-Quote seit dem Jahr 2015 nicht mehr rentabel. Ebenfalls dürften Anbaubetriebe die zusätzliche Bilanzierung von Landnutzungsänderungen scheuen, da dies das Verfahren für Erzeuger und Zertifizierer deutlich verkompliziert (Fehrenbach, 2013). Direkte Landnutzungsänderungen, die vor dem Januar 2008 erfolgten, werden bei der Bilanzierung der THG-Emissionen nach Richtlinie 2009/28/EG nicht berücksichtigt.

Beim Energiepflanzenanbau im Kontext der Biogasnutzung stellt sich die Situation abweichend dar. Da die Biogasverstromung nicht unter die BioSt-NachV fällt, gibt es auch keine Anforderungen an das Treibhausgas-Minderungspotenzial, so dass hier z. B. ein Grünlandumbruch für einen nachfolgenden Silomaisanbau nicht ausgeschlossen ist. Darüber hinaus besteht bei der Biogasgewinnung - anders als beim Energiepflanzenanbau zur Biokraftstoffproduktion - aufgrund limitierter Transportwege ein deutlich stärkerer räumlicher Bezug zwischen Substratanbau und -nutzung. Im Kontext der vielfach hohen regionalen Konzentration der Biogasanlagen (z. B. in den Veredelungsregionen) existiert damit ein vergleichsweise großer Druck, Flächen im unmittelbaren Umfeld für den Anbau von Biogassubstraten verfügbar zu machen, z. B. auch durch Umwandlung von Grünland. Würde man z. B. auch beim Biogas den Referenzzeitpunkt Januar 2008 für die Bilanzierung der direkten Landnutzungsänderungen zugrunde legen, hätte dies Auswirkungen auf die Bilanzierungsergebnisse, da nach 2008 noch ein großer Biogasausbau mit entsprechender Flächennutzungsänderung erfolgte.

Von den bisher beschriebenen direkten Landnutzungsänderungen sind die indirekten Landnutzungsänderungen zu unterscheiden. Indirekte Landnutzungsänderungen treten auf, wenn z. B. bisherige Ackerflächen für den Nahrungs- und Futtermittelanbau zum Energiepflanzenanbau genutzt werden. Um einen unveränderten (oder gar steigenden) globalen Bedarf an Nahrungs- und Futtermitteln zu decken, müssen dann an anderer Stelle Agrarflächen erschlossen werden. Diese Ausweitung betrifft häufig auch besonders kohlenstoffreiche Ökosysteme (z. B. Wälder), bei deren Umwandlung in Agrarflächen der Kohlenstoff aus diesen natürlichen Kohlenstoffsenken freigesetzt wird.

Die Effekte indirekter Landnutzungsänderungen können im Rahmen dieses Berichts bei der Berechnung der Treibhausgasemissionen nicht berücksichtigt werden, da es derzeit keine einheitlich anerkannte Methode dafür gibt. Trotz jüngster wissenschaftlicher Verbesserungen des Modellrahmens hängen die Ergebnisse weiterhin stark von den verwendeten Annahmen ab, zu deren Abstimmung es weiterer Forschung und politischer Entscheidungskraft bedarf. Insgesamt zeigen die in den letzten Jahren durchgeführten wissenschaftlichen Arbeiten, dass sich die aus indirekten Landnutzungsänderungen resultierenden Emissionen zwischen den einzelnen Rohstoffen stark unterscheiden können. Als Folge können sich die Treibhausgasminderungen einzelner Biokraftstoffe gegenüber den fossilen

Substituten teilweise oder ganz aufheben. Im Herbst 2012 unterbreitete die Europäische Kommission auf Basis verschiedener Expertisen einen ersten, kontrovers diskutierten Vorschlag (Europäische Kommission, 2012), in welcher Weise indirekte Landnutzungsänderungen im Rahmen der Richtlinien 98/70/EG und 2009/28/EG bilanziert und berichtet werden könnten. Dieser Vorschlag wurde mit der endgültigen Änderungs-Richtlinie (Richtlinie (EU) 2015/1513, 2015) in modifizierter Form umgesetzt (Tabelle 3).

Tabelle 3: Vorläufige Schätzwerte für Emissionen infolge von indirekten Landnutzungsänderungen durch Biokraftstoffe und flüssige Biobrennstoffe (g CO₂-Äq. / MJ)

Rohstoffgruppe	Mittelwert ⁵	Aus der Sensitivitätsanalyse abgeleitete Bandbreite zwischen den Perzentilen ⁶
Getreide und sonstige Kulturpflanzen mit hohem Stärkegehalt	12	8 bis 16
Zuckerpflanzen	13	4 bis 17
Ölpflanzen	55	33 bis 66

Quelle: (Richtlinie (EU) 2015/1513, 2015)

Mit der Richtlinie (EU) 2015/1513 wurden auch verschiedene Berichtspflichten mit Bezug zu indirekten Landnutzungsänderungen eingeführt.

Zukünftig werden die Kraftstoffanbieter bei der Meldung u. a. der Treibhausgas-Emissionen pro Energieeinheit auch die durchschnittlichen vorläufigen Schätzwerte für Emissionen infolge indirekter Landnutzungsänderungen berücksichtigen. Die Europäische Kommission bezieht in ihrem letzten Fortschrittsbericht „Erneuerbare Energiequellen“ im Zuge der Berichterstattung zu den erzielten Treibhausgas-Emissionseinsparungen die durchschnittlichen vorläufigen Schätzwerte zu indirekten Landnutzungsänderungen in Anhang VIII der RL 2009/28/EG ebenfalls ein. Im Ergebnis verringerten sich die von den Mitgliedsstaaten berichteten biokraftstoffbedingten THG-Einsparungen für das Jahr 2015 zwischen 40 und 80 % (Europäische Kommission, 2017). Die EU-Kommission hat im November 2016 im Zuge ihrer Gesetzesinitiativen zum Thema „Saubere Energie für alle Europäer“ Vorschläge zur schrittweisen Verringerung des Anteils der aus Nahrungsmittelpflanzen gewonnenen Biokraftstoffe nach 2020 vorgelegt (Europäische Kommission, 2016).

Eine Anwendung der vorgeschlagenen Methodik in der UBA-Emissionsbilanz auf Basis der im Jahr 2016 in Deutschland eingesetzten Biokraftstoffe und deren Emissionsfaktoren ergibt, dass sich die ohne Berücksichtigung von indirekten Landnutzungsänderungen abgeleitete THG-Minderung von insgesamt 6,3 Mio. CO₂-Äq. auf rund 2,9 Mio. CO₂-Äq. (Spannbreite 2,1 bis 4,4 Mio. CO₂-Äq. um 54 % (Spannbreite 31 bis 67 %) verringert.

2.2 Datenquellen

In diesem Abschnitt werden die wesentlichen Datenquellen beschrieben, die im Rahmen dieser Emissionsbilanz verwendet wurden.

⁵ Die angegebenen Mittelwerte stellen einen gewichteten Durchschnitt der individuell dargestellten Rohstoffwerte dar.

⁶ Die hier berücksichtigte Bandbreite entspricht 90 % der Ergebnisse unter Verwendung des aus der Analyse resultierenden fünften und fünfundneunzigsten Perzentilwerts.

2.2.1 Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energien von der AGEE-Stat

Die Bilanzdaten zur Energiebereitstellung - das Mengengerüst der erneuerbaren Energien - stützt sich im Wesentlichen auf die Erhebungen bzw. Berechnungen der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat). Das unabhängige Fachgremium wurde 2004 vom damaligen Bundesumweltministerium (BMU) im Einvernehmen mit dem Bundeswirtschaftsministerium (BMWi) und dem Bundeslandwirtschaftsministerium (BMELV) eingerichtet, um Statistik und Daten der erneuerbaren Energien auf eine umfassende, aktuelle und abgestimmte Basis zu stellen. Seit dem Wechsel der ministeriellen Zuständigkeiten zum Thema erneuerbaren Energien arbeitet die AGEE-Stat im Auftrag des Bundeswirtschaftsministeriums.

Eine wesentliche Datenquelle für das Mengengerüst der AGEE-Stat ist die amtliche Energiestatistik des Statistischen Bundesamtes in Zusammenarbeit mit den Statistischen Landesämtern. Als weitere Datenquellen sind insbesondere die EEG-Abrechnung der Übertragungsnetzbetreiber sowie für den Wärmesektor die Angaben verschiedener Verbände aus dem Bereich erneuerbarer Energien zu nennen. Informationen zu den Biokraftstoffen entstammen im Wesentlichen den amtlichen Mineralöldaten des Bundesamts für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA).

Aktuelle Daten über die Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland werden in der jährlichen Publikation „Erneuerbare Energien in Zahlen - Nationale und internationale Entwicklung“ (BMWi, 2017) veröffentlicht. Die Veröffentlichung erfolgt im September des darauffolgenden Jahres. Zusätzlich erfolgt jeweils zum Februar/März eine erste Schätzung sowie zum Jahresende des Folgejahres eine Datenaktualisierung. In diesem Zusammenhang werden auch die Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien auf der Website des BMWi⁷ veröffentlicht. Die Dokumentation „Datenquellen und Methodik der AGEE-Stat-Zeitserien zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland“ (UBA, 2016) liefert zudem eine inhaltliche Zusammenfassung der angewandten Methodik im Stromsektor. Insbesondere Aspekte des Eigenverbrauchs erneuerbarer Stromproduzenten werden hierbei adressiert.

2.2.2 Emissionsfaktoren für die direkten Emissionen aus dem Nationalen Emissionsinventar (ZSE)

Für den vorliegenden Bericht wurden die zur Berechnung der vermiedenen direkten Emissionen benötigten Emissionsfaktoren für fossile und biogene Brennstoffe aus dem „Zentralen System Emissionen“ (ZSE) entnommen.

Die ZSE-Datenbank des Umweltbundesamtes wird für die zentrale Datenhaltung aller für die Emissionsberechnung und -berichterstattung benötigten Informationen (Endenergiebereitstellung, Emissionsfaktoren) verwendet und speichert diese in Form von Zeitreihen. Als Grundlage der nationalen Emissionsberichterstattung (UBA, 2017) ist es national die bestverfügbare Datenquelle, die alle Informationen zu den Schadstoffemissionen der fossilen und der biogenen Energiebereitstellung enthält. Durch internes Qualitätsmanagement und internationale Überprüfungsprozesse werden diese Daten jährlich qualitätsgesichert und bestätigt.

Zur inhaltlichen Weiterentwicklung der Emissionsberichterstattung des Umweltbundesamtes - insbesondere zur Anpassung der Emissionsfaktoren an den durchschnittlichen Anlagenbestand in Deutschland - werden in regelmäßigen Abständen Fachgutachten eingeholt. Folgende Forschungsvorhaben der letzten Jahre sind für die Emissionsbilanz erneuerbarer Energien besonders relevant:

⁷ Die aktuellen Daten in der Zeitreihe ab 1990 sind abrufbar unter: http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html

- ▶ Fortschreibung der Emissionsfaktoren für Feuerungs- und Gasturbinenanlagen nach 13./17. Bundesimmissionsschutzverordnung (BImSchV) und TA Luft (Fichtner, Karl, Hartel, Balussou, & D., 2011),
- ▶ Emissionsfaktoren für Biogasanlagen: „Emissionsanalyse und Quantifizierung von Stoffflüssen durch Biogasanlagen im Hinblick auf die ökologische Bewertung der landwirtschaftlichen Biogasgewinnung und Inventarisierung der deutschen Landwirtschaft“ (Liebetrau, et al., 2011),
- ▶ Emissionsfaktoren für Haushalte und Kleinverbraucher: „Ermittlung und Aktualisierung von Emissionsfaktoren für das nationale Emissionsinventar bezüglich kleiner und mittlerer Feuerungsanlagen der Haushalte und Kleinverbraucher“ (Tebert, Volz, & Töfge, 2016).

Die direkten Emissionsfaktoren im Verkehrsbereich basieren überwiegend auf Daten des „Handbuchs für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA, Version 3.2) (INFRAS, 2014), welche auch dem Emissionsberechnungsmodell TREMOD (Traffic Emission Estimation Model) und dem ZSE zugrunde liegen.

2.2.3 IFEU-Studie zur Aktualisierung der Eingangsdaten und Emissionsbilanzen wesentlicher biogener Energienutzungspfade (BioEm)

Die vom Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (IFEU) ausgearbeitete „Studie zur Aktualisierung der Eingangsdaten wesentlicher biogener Energienutzungspfade“ (BioEm) (IFEU, 2016) hat Emissionen von Bioenergieträgern, welche für Deutschland Relevanz haben, über den gesamten Lebensweg ökobilanziell modelliert. Die daraus resultierenden Emissionsfaktoren umfassen neben den Treibhausgasen auch weitere wesentliche Luftschadstoffe, die für die Emissionsbilanzierung erneuerbarer Energien relevant sind. Dabei orientiert sich die Studie in Bezug auf die Methodenvorgaben und den verwendeten Hintergrunddaten so nahe wie möglich an den einschlägigen Regelwerken der EU Kommission und deren Erweiterungen.

Das dadurch vorgegebene Methodengerüst umfasst neben generellen Regeln zu den funktionellen Einheiten sowie Charakterisierungsfaktoren für die Aggregation der verschiedenen Treibhausgase, auch Komponenten zum Anbau und zur Verarbeitung der Biomasse unter Berücksichtigung der verwendeten Nebenprodukte und der erzeugten Endenergie. Ferner wurde der Transport, der Vertrieb sowie die anschließende Nutzung der Bioenergie berücksichtigt. Erstmals wurden auch Regeln zum Einbezug von Landnutzungsänderung (direkt wie indirekt) in das Methodengerüst integriert, die allerdings aufgrund der weiterhin bestehenden methodischen Unsicherheiten noch keinen Eingang in diese Emissionsbilanz finden. Vergleiche mit anderen Datenbanken (GEMIS, ecoinvent) machen die z. T. großen Bandbreiten der Ergebnisse für einzelne Bioenergieträger deutlich. Die Ergebnisse der Studie erlauben es, Emissionsfaktoren im Bereich der Vorketten und der fremdbezogenen Hilfsenergie für zahlreiche biogene Energienutzungspfade für die Emissionsbilanzierung erneuerbarer Energien abzuleiten.

2.2.4 Ökobilanzdaten für Vorketten-Emissionsfaktoren aus GEMIS und ecoinvent

Die Quantifizierung der Umweltbelastung durch die Herstellung von Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien, durch die Bereitstellungs-(Vor)ketten fossiler und biogener Energieträger sowie durch ggf. für den Anlagenbetrieb erforderliche Hilfsenergien setzt ökobilanzielle Modellierungen über den gesamten Lebensweg voraus. Zu diesem Zweck wurden vorhandene Ökobilanz-Studien und Datenbanken herangezogen, insbesondere GEMIS und ecoinvent.

Die diesem Bericht zugrundeliegenden Daten im Bereich der Vorketten fossiler und erneuerbarer Energieträger basieren mit Ausnahme der biogenen Energienutzungspfade auf GEMIS, einem für die

Analyse von lebenswegbezogenen Daten im Energiebereich (sowie für Stoff- und Transportprozesse) seit 1989 am Öko-Institut entwickelten, frei zugänglichen „Globalen Emissions-Modell Integrierter Systeme“ (Fritsche & Schmidt, 2008). Für die vorliegende Emissionsbilanz werden insbesondere die in GEMIS 4.94 hinterlegten Ergebnisse des BMU-Forschungsvorhabens „Aktualisierung von Ökobilanzdaten für Erneuerbare Energien im Bereich Treibhausgase und Luftschadstoffe“ als Grundlage zur Ableitung repräsentativer Emissionsfaktoren verwendet (Rausch & Fritsche, 2012). In dem Forschungsvorhaben wurden unter Leitung des Öko-Instituts von verschiedenen Forschungseinrichtungen Ökobilanzdaten zu folgenden Teilbereichen erarbeitet. Im Weiteren relevant für diese Studie sind insbesondere:

- ▶ solare Wärmebereitstellung: DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Technische Thermodynamik,
- ▶ Geothermische Strom- und Wärmeerzeugung: GZB - Geothermiezentrum Bochum,
- ▶ Stromerzeugung mit Windenergie: IWES - Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik,
- ▶ Stromerzeugung mit Wasserkraft: ESU services (CH),
- ▶ Stromerzeugung durch photovoltaische Systeme: SmartScreenScans (NL).

Neben der frei zugänglichen GEMIS-Datenbank stützt sich der vorliegende Bericht in einzelnen Fällen auch auf die kostenpflichtige Ökobilanz-Datenbank ecoinvent des schweizerischen „Centre for Life Cycle Inventories“. Bei ecoinvent handelt es sich um eine international anerkannte Ökobilanzdatenbank mit Daten unter anderem für die Bereiche Energie (Strom, Öl, Kohle, Erdgas, Biomasse, Biotreibstoffe, Bioenergie, Wasserkraft, Atomenergie, Photovoltaik, Windkraft, Biogas), Materialien, Abfallentsorgung (Kehrichtverbrennung, Deponie, Abwasserreinigung), Transporte, landwirtschaftliche Produkte und Prozesse, Metallverarbeitung etc. (ecoinvent, 2017).

2.2.5 Evaluationsbericht gem. Biokraft-NachV / BioSt-NachV der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung

In der hier vorgelegten Emissionsbilanz stammen die Angaben über die Herkunftsländer und die Rohstoffbasis der in Deutschland in Verkehr gebrachten Biokraftstoffe aus dem Evaluationsbericht gemäß Biokraft-NachV/ BioSt-NachV der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE).

Mit der Richtlinie 2009/28/EG wurden von der Europäischen Union Nachhaltigkeitsanforderungen für die Herstellung und energetische Nutzung von flüssiger und gasförmiger Biomasse festgelegt, die zur Erfüllung bestimmter Quotenverpflichtungen oder Fördertatbestände zur Anrechnung gebracht werden können. Dies betrifft insbesondere Pflanzenöle wie Palm-, Soja- und Rapsöl sowie flüssige Biokraftstoffe wie Biodiesel, Pflanzenölkraftstoff und Bioethanol. Die Vorgaben der Richtlinie 2009/28/EG werden durch die Biomassestrom- (BioSt-NachV) und die Biomassekraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung (Biokraft-NachV) in deutsches Recht umgesetzt. Eine Zertifizierung der Einhaltung von Vorgaben der Nachhaltigkeitsverordnungen erfolgt entlang der gesamten Herstellungs- und Lieferkette, also vom Landwirt bis zum Nachweispflichtigen, im Biokraftstoffbereich. Die Verordnungen sind im Jahr 2011 in Kraft getreten, seitdem werden in Deutschland aus wirtschaftlichen Gründen nur Rohstoffe zur Biokraftstoffherstellung verwendet, die nachhaltig zertifiziert sind. Die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung ist in Deutschland die zuständige Behörde für die Umsetzung der

Nachhaltigkeitskriterien-Richtlinie 2009/28/EG. Die Abwicklung der Nachhaltigkeitsnachweise⁸ erfolgt über das Nachhaltige-Biomasse-System (Nabisy) (BLE, 2016).

Die Angaben aus Nabisy enthalten u. a. Informationen über die Herkunftsländer und den Rohstoffeinsatz bei der Herstellung und Verwendung von Biokraftstoffen. Weiterhin wird über Nabisy die Erfüllung der in der Biokraft-NachV verpflichtend festgeschriebenen Treibhausgas-Minderungen erfasst (vgl. Kapitel 6).

2.2.6 Substitutionsfaktoren im Stromsektor von Fraunhofer ISI

Zu einer vollständigen Berechnung der Emissionsbilanzen erneuerbarer Energieträger sind Annahmen erforderlich, welche fossilen Energieträger durch den Einsatz erneuerbarer Energieträger substituiert wurden. Der vorliegenden Berechnung liegen die im Rahmen des Gutachtens „CO₂-Minderung im Stromsektor durch den Einsatz erneuerbarer Energien im Jahr 2012 und 2013“ von Fraunhofer ISI ermittelten Substitutionsfaktoren zugrunde (ISI, 2016). Ziel dieses Fachgutachtens war es, die durch den Einsatz erneuerbarer Energien im Stromsektor substituierte Stromerzeugung in konventionellen Kraftwerken zu bestimmen und anteilig den einzelnen erneuerbaren Energieträgern zuzuordnen.

Die Simulation zum Einsatz des Kraftwerksparks wurde mithilfe des agentenbasierten Simulationsmodells PowerACE⁹ durchgeführt. Dieses Strommarktmodell bildet den Kraftwerkseinsatz entlang der Merit-Order für jede Stunde des betreffenden Jahres ab. Bei der Erstellung der Merit-Order für fossile Kraftwerke werden auch technische Randbedingungen wie Anfahrkosten oder Kraft-Wärme-Kopplung und Einfluss des CO₂-Zertifikatehandels berücksichtigt. Als Eingangsdaten zur Modellierung dienen reale Stromlastprofile sowie Daten zum typischen Einspeiseverhalten erneuerbarer Energien, die zum Teil auf Basis meteorologischer Daten ermittelt wurden. Aufgrund des zunehmenden Einflusses der ansteigenden Bruttostromerzeugung aus erneuerbarer Energien auf die deutsche Strom-Außenhandelsbilanz, werden die Substitutionseffekte im Kontext des europäischen Binnenmarkts berechnet. Hierfür werden insbesondere die an Deutschland angrenzenden Länder in die Betrachtung der Substitutionsbeziehungen mit einbezogen.

Über einen Szenarienvergleich mit und ohne erneuerbare Energien im Kraftwerkspark werden die jeweils verdrängten fossilen Kraftwerkskapazitäten im In- und Ausland analysiert. Hierfür wird für das Szenario ohne erneuerbare Energien (Counterfactual Scenario) zur Deckung der Stromnachfrage eine zusätzliche fossile Kraftwerkskapazität von ca. 9 GW implementiert. In Hinblick auf die Verteilung der Energieträger wird angenommen, dass 70 Prozent Steinkohle-Kraftwerke und 30 Prozent Erdgas-Kraftwerke eingesetzt werden. In Bezug auf die Wirkungsgrade wird unterstellt, dass hiervon 4 GW auf alte Bestandskraftwerke mit niedriger Effizienz entfallen und der verbleibende Rest auf virtuelle Neubauten.

Die nach Lastsituation und Erzeugung stündlich variierenden Simulationsergebnisse werden schließlich zu einem Jahresmittel zusammengefasst. Durch Berücksichtigung der Außenhandelsbeziehungen lassen sich 65 Prozent der vermiedenen Emissionen für das Jahr 2013 auf in Deutschland verdrängte fossile Kraftwerkskapazitäten zurückführen. Die restlichen 35 Prozent der Emissionen werden durch Substitution in den Nachbarländern vermieden. Alle abgeleiteten Substitutionsfaktoren der einzelnen erneuerbaren Energieträger im Stromerzeugungssektor sind in Kapitel 4 aufgeführt.

⁸ Sowohl die Anrechnung zur Biokraftstoffquote als auch die Inanspruchnahme der Steuerentlastung nach dem Energiesteuergesetz setzen den Nachweis von Nachhaltigkeitszertifikaten voraus.

⁹ Siehe: Senfuß, Frank: Assessment of the impact of renewable electricity generation on the German electricity sector. An agent-based simulation approach, Karlsruhe 2007 (<http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1000007777>).

2.2.7 RWI/forsa-Erhebungen des Energieverbrauchs der privaten Haushalte

Das Rheinisch-Westfälische Institut für Wirtschaftsforschung (RWI Essen) hat zusammen mit der Gesellschaft für Sozialforschung und statistische Analysen mbH (forsa) im Auftrag des BMWi seit dem Jahr 2003 mehrere Forschungsvorhaben zur „Erhebung des Energieverbrauchs der privaten Haushalte“ durchgeführt. Hintergrund dieser Zusatzerhebung ist unter anderem, dass im Zuge des Energiestatistikgesetzes 2002 keine amtliche Erhebung für diesen relevanten Endenergiesektor etabliert werden konnte.

Ziel der Studien ist die Gewinnung aussagekräftiger Informationen über den Energieverbrauch privater Haushalte in Deutschland. Dies geschieht mittels einer Stichprobenerhebung, die auf einem repräsentativen Panel von rund 10.000 Haushalten des forsa-Instituts basiert (forsa-omninet Panel). Diese Haushalte werden u. a. umfassend zu ihrem Verbrauch der jeweils benutzten Energieträger, den Wohnverhältnissen und den Charakteristika des bewohnten Gebäudes befragt. Ausgehend von einer Nettostichprobe mit 6.533 Haushalten, was einer Ausschöpfung von 72 Prozent entspricht, werden die Verbrauchskennziffern nach einzelnen Energieträgern auf die Grundgesamtheit aller privaten Haushalte in Deutschland hochgerechnet (RWI/forsa, 2011).

Auf der Basis von Detailauswertungen dieser Erhebungen wurden Substitutionsfaktoren für erneuerbare Wärme aus solarthermischen und Wärmepumpenanlagen sowie Holz-Einzelf Feuerungen im Bereich private Haushalte abgeleitet. Weitere Details bzgl. der Herleitung für die einzelnen Energieträger des Wärme- bzw. Verkehrssektors können den Unterkapiteln Substitutionsfaktoren des jeweiligen Sektors entnommen werden (vgl. Kapitel 5 und 6)

2.3 Unsicherheiten und Forschungsbedarf

Die im vorliegenden Bericht verwendeten Datenquellen sind zum Teil mit Unsicherheiten behaftet. Das größte Wissensdefizit besteht im Bereich der Biomassenutzung. Dies gilt insbesondere für die Emissionen beim Anbau von Energiepflanzen, beim Betrieb von Biomasseanlagen und bei der Herstellung von Biokraftstoffen. Bei Letzterem sind insbesondere Analysen zum Strom- und Wärmebedarf sowie zu den Stoffflüssen angezeigt.

Auch die Datenlage zu landwirtschaftlichen Vorketten und entsprechenden Energieeinsätzen ist verbesserungsbedürftig. So stützen sich beispielsweise die mit den Angaben der BLE korrespondierenden Biokraftstoffemissionsbilanzen in diesem Bericht auf Daten vor 2010.

Speziell für den Energiepflanzenanbau ist die Notwendigkeit einer detaillierteren Untersuchung sowohl von direkten Landnutzungsänderungen (u. a. Grünlandumbruch) als auch von indirekten Landnutzungsänderungen (Verdrängungs- und Umnutzungseffekte als Konsequenz des Anbaus von Energiepflanzen, „iLUC“) von großer Bedeutung.

Des Weiteren besteht Forschungsbedarf in Hinblick auf die Emissionsfaktoren sowohl aus den Vorketten als auch aus dem unmittelbaren Anlagenbetrieb. Aufgrund der dynamischen Marktentwicklung müssen die ökobilanziellen Datensätze regelmäßig an die technische Entwicklung des Anlagenbestandes angepasst werden. Dabei sollte die Forschungspriorität auf der Absicherung der Erkenntnis der energetischen Nutzung fester, gasförmiger und flüssiger Biomasse liegen. Von besonderer Bedeutung sind großflächige, repräsentative Erhebungen unter realen Betriebsbedingungen. Ziel wäre es den Erkenntnisstand zu den biogenen Stoffströmen, zu Nutzungseffizienzen sowie zu Anlagenemissionen differenziert nach Brennstoffen, Leistungsgrößen der Anlagen und Luftreinigungstechniken zu verbessern. Prüfbedarf besteht ebenfalls hinsichtlich einer möglichen Ausweitung der betrachteten Schadstoffliste auf weitere Schadstoffe (z. B. Ammoniak).

Ein weiterer Schwerpunkt für die zukünftige Arbeit besteht in der stärkeren Vernetzung mit europäischen Akteuren, um eine bessere Vergleichbarkeit der Berichterstattung zu den Emissionsbilanzen anderer Länder der Europäischen Union sicherzustellen.

3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Das vorliegende Kapitel fasst die Ergebnisse der Emissionsbilanzen der einzelnen erneuerbaren Energieträger zusammen, die sektoral getrennt nach Strom, Wärme und Verkehr in den Kapiteln 4, 5 und 6 im Detail dargestellt sind.

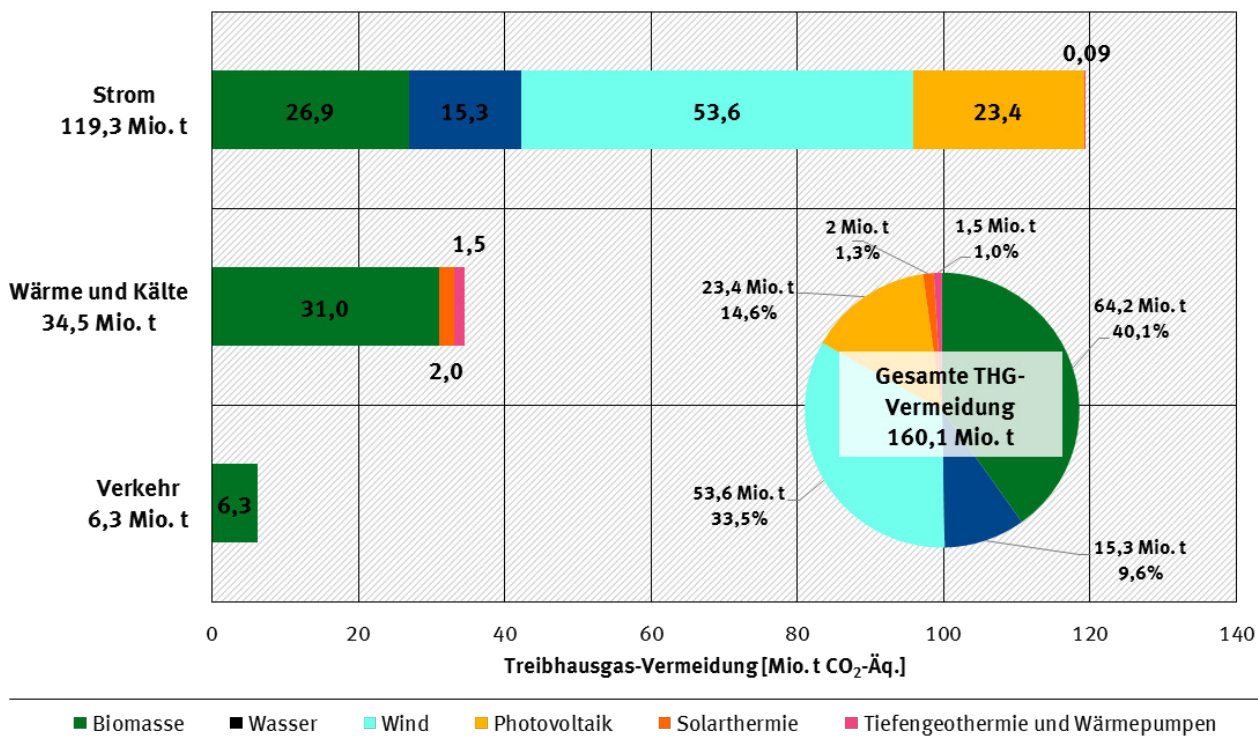
Aufgrund ihrer hohen umweltpolitischen Relevanz stehen die untersuchten Treibhausgasemissionen im Fokus der Betrachtung. Darüber hinaus werden zudem wesentliche Luftschadstoffemissionen mit Relevanz für Umwelt und Gesundheit betrachtet.

Wie im Kapitel 2.1 dargestellt, werden in der vorliegenden Bilanz die durch erneuerbare Energieträger verursachten Emissionen den vermiedenen Emissionen einer alternativen, fossilen Energieerzeugung gegenübergestellt. Die zugrunde liegenden Berechnungen basieren dabei auf den aktuellen Daten zum Einsatz erneuerbarer Energien in Deutschland sowie deren Substitutionseffekten. Dabei werden grundsätzlich alle vorgelagerten Prozessketten zur Gewinnung und Bereitstellung der Energieträger berücksichtigt, so dass sich ein umfassendes Bild der Emissionswirkungen ergibt.

3.1 Emissionsbilanzen für Treibhausgase

Die Ergebnisse der Emissionsbilanz zeigen, dass der Ausbau erneuerbarer Energien wesentlich zur Erreichung der Klimaschutzziele in Deutschland beiträgt. In allen Verbrauchssektoren (Strom, Wärme und Verkehr) werden fossile Energieträger zunehmend durch erneuerbare Energien ersetzt. Die dadurch vermiedenen Treibhausgasemissionen sind ein zentraler Baustein auf dem Weg zu einem treibhausgasneutralen Deutschland (vgl. (UBA, 2017)).

Abbildung 1: Netto vermiedene Treibhausgasemissionen durch die Nutzung erneuerbarer Energien im Jahr 2016



Quelle: Eigene Darstellung des UBA

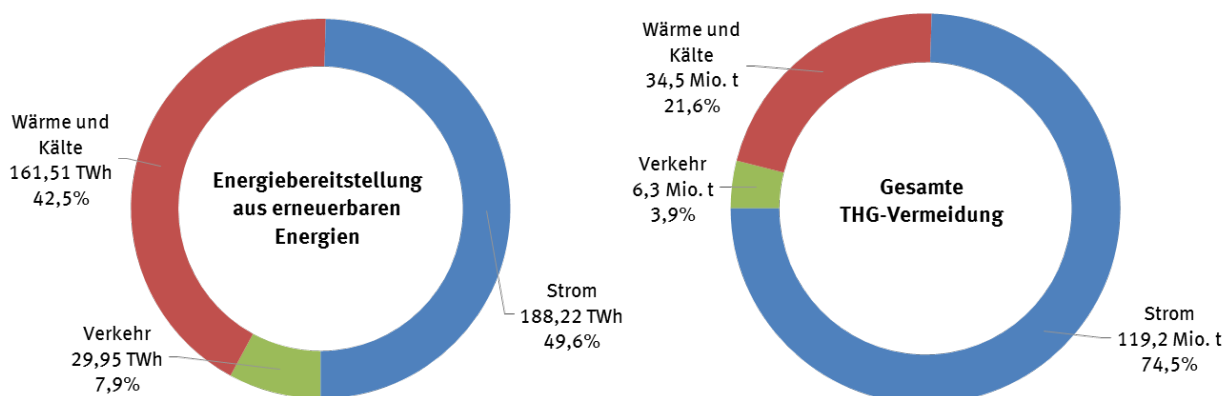
Die aktuellen Berechnungen, dargestellt in Abbildung 1, zeigen auf, dass der Einsatz erneuerbarer Energien im Jahr 2016 insgesamt Treibhausgasemissionen in Höhe von 160 Mio. t CO₂-Äq. vermieden

hat. Davon sind 74,5 Prozent der Strombereitstellung durch erneuerbare Energien zuzurechnen. Insgesamt wurden 119,3 Mio. t CO₂-Äq. im Stromsektor vermieden. Im Bereich der Wärme- und Kältebereitstellung wurden durch erneuerbare Energien 34,5 Mio. t CO₂-Äq. (21,6 Prozent) und im Kraftstoffbereich 6,3 Mio. t CO₂-Äq. (3,9 Prozent) vermieden. Die Zahlen der Abbildung 1 verdeutlichen zudem, dass die Emissionsminderungen in entscheidendem Maße von den eingesetzten und verdrängten Energieträgern abhängen.

Bei der Berechnung der Emissionsbilanz wurden deshalb die jeweiligen Substitutionseffekte der einzelnen erneuerbaren Energieträger bzw. Erzeugungstechnologien soweit wie möglich differenziert betrachtet. Bei den Biokraftstoffen sind besonders die Art und Herkunft der verwendeten Rohstoffe für die resultierenden Emissionen und Emissionsvermeidungen ausschlaggebend. Die exakte Bilanzierung ist hier mit einigen Unsicherheiten verbunden, da Verdrängungseffekte und sekundäre Landnutzungsänderungen bislang nicht in die Berechnung einfließen (vgl. Kapitel 2.1.3).

Bei der vergleichenden Betrachtung der Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energien und den dadurch vermiedenen Emissionen (siehe Abbildung 2) fällt auf, dass sich die Anteile der einzelnen Sektoren deutlich unterscheiden. Während die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien 49,6 Prozent der gesamten im Jahr 2016 bereitgestellten erneuerbaren Energien ausmachte, betrug ihr Anteil an den dadurch netto vermiedenen Treibhausgasemissionen 74,5 Prozent. Im Wärme- und Verkehrssektor wurden zusammen 49,4 Prozent der erneuerbaren Energien verwendet, die allerdings nur knapp über 25 Prozent zur Gesamtemissionsvermeidung beitrugen.

Abbildung 2: Anteile der Sektoren an der Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energien und den dadurch vermiedenen THG-Emissionen im Jahr 2016



Quelle: Eigene Darstellung des UBA

In Tabelle 4 sind die Netto-Vermeidungsfaktoren zusammenfassend für die untersuchten Treibhausgase in den untersuchten Sektoren dargestellt. Die sektorspezifischen Treibhausgasbilanzen unterscheiden sich teilweise erheblich. Dies spiegelt sich in unterschiedlichen Emissions-, Substitutions- und Vermeidungsfaktoren wider.

Im Stromsektor wird im Vergleich zu den anderen Sektoren die höchste spezifische Vermeidungswirkung erreicht. Dies kann zum einen damit erklärt werden, dass bei den erneuerbaren Energien im Strombereich hauptsächlich Technologien zum Einsatz kommen, die Strömungs-, Wind- und solare Strahlungsenergie in elektrische Energie umwandeln und damit nur geringe direkte Emissionen verursachen. Zudem substituieren diese Technologien gleichzeitig eine relativ verlustreiche Stromerzeugung in thermischen Kraftwerken mit großem fossilem Primärenergieträgereinsatz und entsprechend hohen direkten Emissionen. Somit ist der Stromsektor bisher die wichtigste Säule der Dekarbonisierungserfolge.

Im Wärme- und Verkehrssektor sind die Unterschiede der Umwandlungstechnologien bzw. deren Nutzungsgrade deutlich geringer, sodass auch weniger direkte Emissionen vermieden werden. Hinzu kommt, dass während des Anbaus der zur erneuerbaren Wärme- und Kraftstofferzeugung teilweise zum Einsatz kommenden Energiepflanzen bereits signifikante Treibhausgasemissionen verursacht werden. Sichtbar wird dies an den teilweise negativen Bilanzergebnissen z. B. bei Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O).

Tabelle 4: Emissionsbilanz für wesentliche Treibhausgase durch erneuerbare im Strom-, Wärme- und Verkehrssektor im Jahr 2016

Treibhausgas		durch Bruttostromerzeugung aus EE		durch Endenergieverbrauch aus EE für Wärme und Kälte ¹⁰		durch Endenergieverbrauch im Verkehr (Biokraftstoffe) ¹¹		Gesamt
		Netto-Vermeidungsfaktor [g/kWh]	netto vermiedene Emissionen [1.000 t]	Netto-Vermeidungsfaktor [g/kWh]	netto vermiedene Emissionen [1.000 t]	Netto-Vermeidungsfaktor [g/kWh]	netto vermiedene Emissionen ¹² [1.000 t]	netto vermiedene Emissionen [1.000 t]
Treibhaus-effekt ¹³	CO ₂ -Äq.	634	119.251	214	34.487	211	6.316	160.054
	CH ₄	1,13	211,9	-0,12	-19,95	-0,10	-2,91	189
	N ₂ O	-0,03	-5,0	-0,01	-2,0	-0,09	-2,69	-10
	CO ₂	613	115.455	220	35.590	240	7.189	158.234

Quelle: eigene Berechnung

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Treibhausgas-Emissionsbilanzen im Strom-, Wärme- und Verkehrssektor aufgeschlüsselt nach Energieträgern bzw. Technologien betrachtet. In Abbildung 3, Abbildung 5 und Abbildung 7 sind jeweils die Gesamt-Treibhausgasbilanzen der verschiedenen Energieträger bzw. Technologien in den Sektoren im Jahr 2016 dargestellt. Auf der rechten Seite der Abbildungen (positive Werte) werden die brutto vermiedenen Emissionen aufgeführt, die sich durch die Substitution fossiler Energieträger ergeben. Auf der linken Seite (negative Werte) werden die durch die Energiebereitstellung erneuerbarer Energien verursachten Emissionen dargestellt.

Die Summe der brutto vermiedenen und der verursachten Emissionen ergibt die netto vermiedenen Treibhausgasemissionen für alle untersuchten Energieträger und Technologien. Die netto-vermiedenen Treibhausgasemissionen sind separat am rechten Rand der Abbildung angegeben. Ergänzend stellen die Abbildung 4, Abbildung 6 und Abbildung 8 analog die spezifischen Emissions- und Vermeidungsfaktoren pro kWh bereitgestellte Energie dar.

3.1.1 Stromsektor

Wie Abbildung 3 zeigt, war der Großteil der netto vermiedenen Emissionen im Stromsektor im Jahr 2016 auf die Nutzung der Windenergie an Land (45,1 Mio. t CO₂-Äq.) zurückzuführen, gefolgt von Photovoltaik (23,4 Mio. t CO₂-Äq.), Wasserkraft (15,3 Mio. t CO₂-Äq.) und der Verstromung von Biogas

¹⁰ inkl. Biodiesel, der in der Landwirtschaft verwendet wird

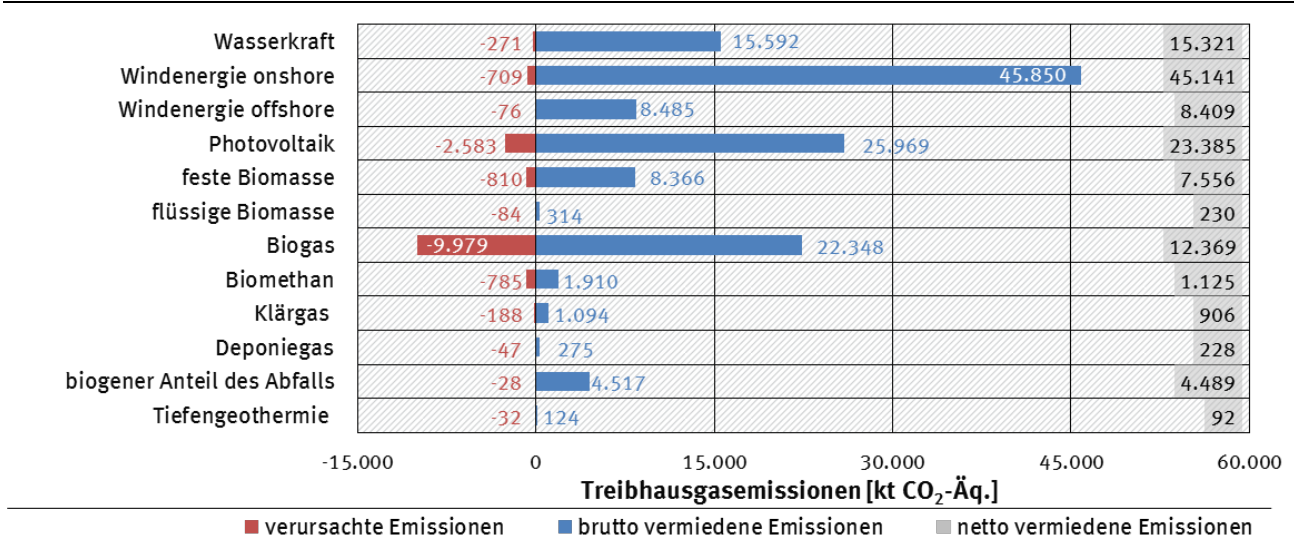
¹¹ nur Biokraftstoffe, ohne Berücksichtigung des Stromverbrauchs im Verkehrssektor

¹² vorläufige Schätzung auf Basis des Vorjahresrohstoffmixes und unter vorwiegender Verwendung der typischen Treibhausgasemissionsfaktoren für Biokraftstoffe nach RL 2009/28/EG

¹³ weitere Treibhausgase (SF₆, FKW, H-FKW) sind nicht berücksichtigt

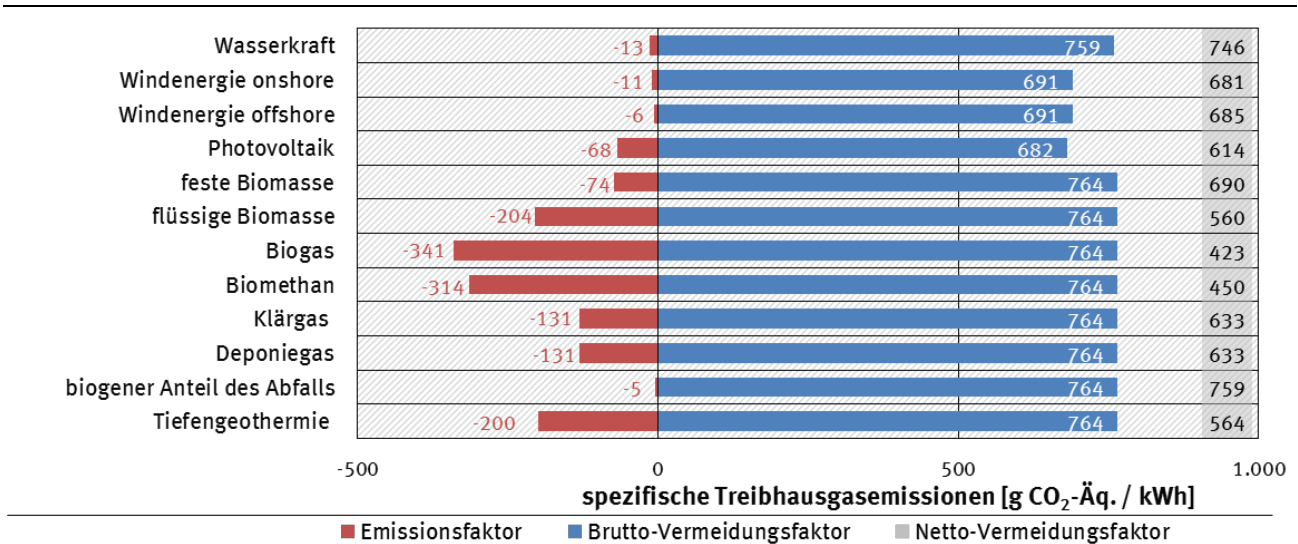
(12,4 Mio. t CO₂-Äq.). Die Netto-Emissionsbilanz von Biogas wird v.a. durch die anfallenden Emissionen beim Anbau der Energiepflanzen im Rahmen der Biogaserzeugung und -nutzung erheblich negativ beeinflusst.

Abbildung 3: Durch den Einsatz erneuerbarer Energien zur Brutto-Stromerzeugung vermiedene und verursachte Treibhausgasemissionen im Jahr 2016 nach Energieträgern



Quelle: Eigene Darstellung des UBA

Abbildung 4: Spezifische Treibhausgasbilanz der Brutto-Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien im Jahr 2016 nach Energieträgern



Quelle: Eigene Darstellung des UBA

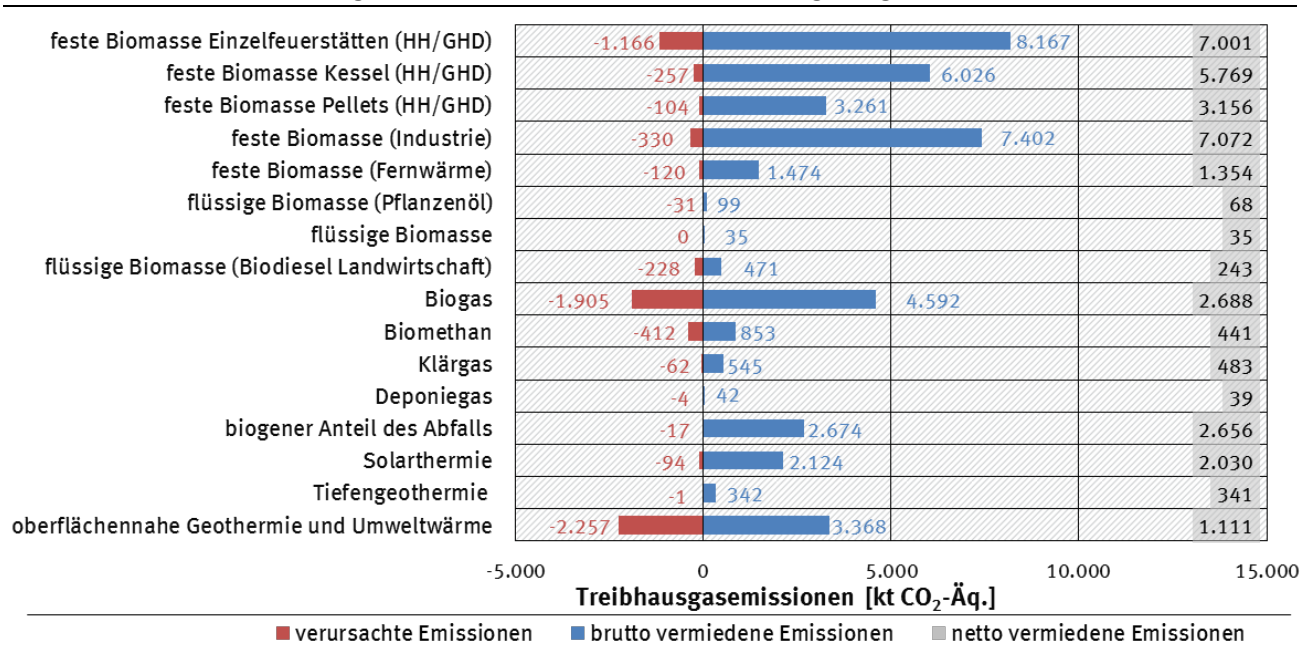
Die spezifischen Treibhausgasbilanzen der zur Stromerzeugung eingesetzten Energieträger (Abbildung 4) unterscheiden sich teilweise deutlich. Die höchsten Netto-Vermeidungsfaktoren ergeben sich durch die energetische Verwertung des biogenen Anteils im Siedlungsabfall (759 g CO₂-Äq. / kWh) sowie durch Wasserkraft (746 g CO₂-Äq. / kWh), während durch den Einsatz von flüssiger Biomasse (560 g CO₂-Äq. / kWh), Biomethan (450 g CO₂-Äq. / kWh), sowie Biogas (423 g CO₂-Äq. / kWh) die ge-

ringsten Vermeidungswirkungen pro erzeugter kWh Strom erreicht werden. Die geringen Schwankungen bei den Brutto-Vermeidungsfaktoren lassen sich durch die verwendeten Substitutionsfaktoren erklären (vgl. Kapitel 2.2.6 und Kapitel 4).

3.1.2 Wärmesektor

Mit einem Anteil von ca. 70 Prozent war der Großteil der insgesamt im Jahr 2016 netto vermiedenen Treibhausgasemissionen von 24 Mio. t CO₂-Äq. im Wärmesektor auf die Nutzung fester Biomasse zurückzuführen (Abbildung 5). So steuerte deren Verwendung in privaten Haushalten (HH) und im Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD) mit 15,9 Mio. t CO₂-Äq. den größten Anteil bei, gefolgt von dem Einsatz fester Biomasse zur Wärmeerzeugung in der Industrie (7,1 Mio. t CO₂-Äq.) und der Nutzung von Biogas (2,7 Mio. t CO₂-Äq.).

Abbildung 5: Durch die Wärmebereitstellung aus erneuerbaren Energien vermiedene und verursachte Treibhausgasemissionen im Jahr 2016 nach Energieträgern



Quelle: Eigene Darstellung des UBA

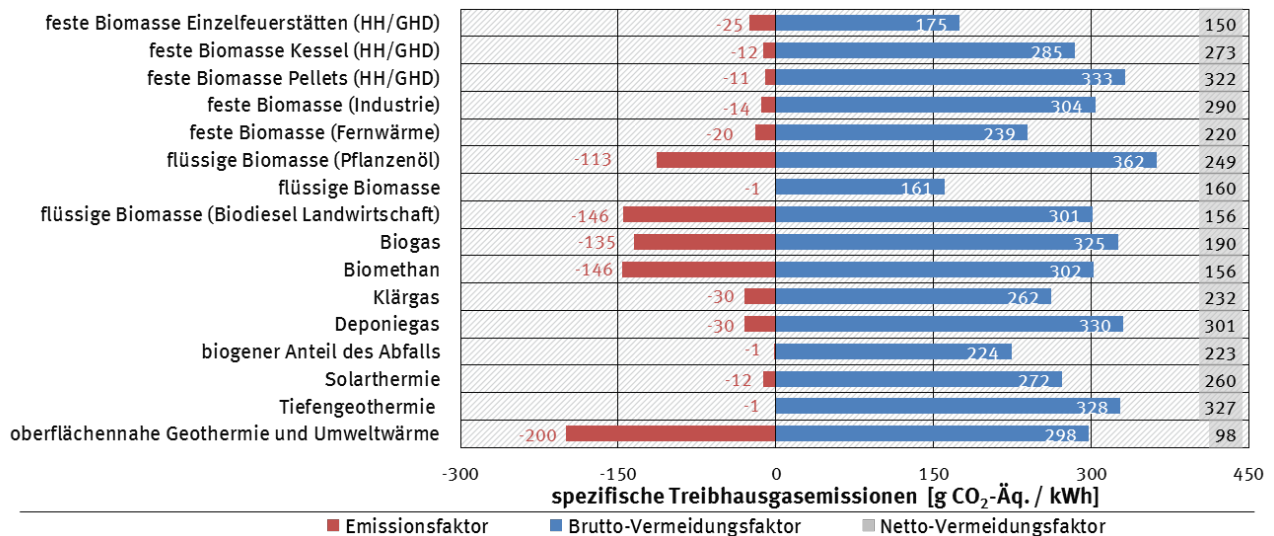
Bei der Betrachtung der spezifischen Treibhausgasemissionen im Wärmesektor (Abbildung 6) wird deutlich, dass die Spannweite der Brutto-Vermeidungsfaktoren der einzelnen erneuerbaren Energieträger bzw. Verwendungsbereiche aufgrund unterschiedlicher Substitutionsmixe im Vergleich zum Stromsektor stärker variiert. Im Jahr 2016 reichten sie von 362 g CO₂-Äq. / kWh beim Einsatz von flüssiger Biomasse aus Pflanzenöl bis zur unteren Grenze von 161 g CO₂-Äq. / kWh bei der Nutzung von flüssiger Biomasse aus weiteren Ausgangsstoffen (u. a. Rest- und Abfallstoffe). Weiterhin gab es große Unterschiede bei den verursachten, spezifischen Treibhausgasemissionen (als negative Emissionsfaktoren auf der linken Seite dargestellt). Hier wies z. B. die Wärmenutzung aus oberflächennaher Geothermie und Umweltwärme einen negativen Emissionsfaktor von -200 g CO₂-Äq. / kWh¹⁴ auf, während andere erneuerbare Energieträger bzw. Verwendungsbereiche sehr geringe spezifische Treibhausgasemissionen von über -20 g CO₂-Äq. / kWh aufwiesen, wie z. B. die Wärmeerzeugung aus fester

¹⁴ Der Brutto-Vermeidungsfaktor der oberflächennahe Geothermie und Umweltwärme ist durch seinen relativ hohen Bedarf von fremdbezogener Hilfsenergie stark abhängig vom derzeitigen Strommix.

und flüssiger Biomasse in privaten Haushalten bzw. im GHD-Bereich, aus biogenem Abfall, sowie aus der Solarthermienutzung.

Entsprechend hatte die oberflächennahe Geothermie und Umweltwärme in der Gesamtbilanz für das Jahr 2016 als Resultat den geringsten Netto-Emissionsvermeidungsfaktor (98 g CO₂-Äq. / kWh), während durch den Einsatz von Pellets in privaten Haushalten und im GHD-Bereich, Deponiegas sowie die Wärmeerzeugung aus Tiefengeothermie die größten Netto-Treibhausgasvermeidungen mit über 300 g CO₂-Äq. pro erzeugter kWh erreicht wurden.

Abbildung 6: Spezifische Treibhausgasemissionen der Wärmebereitstellung aus erneuerbaren Energien im Jahr 2016 nach Energieträgern



Quelle: Eigene Darstellung des UBA

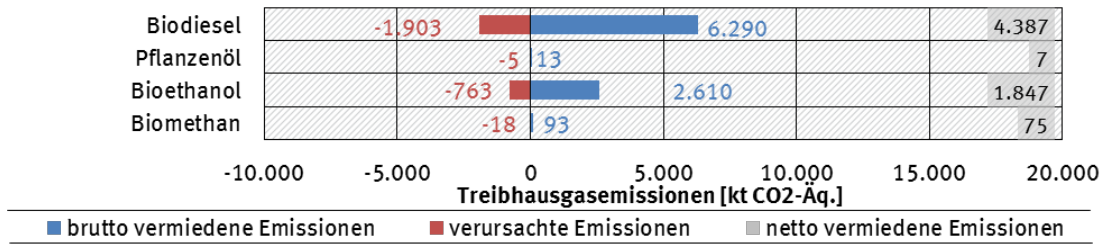
3.1.3 Verkehrssektor

Mit brutto vermiedenen Emissionen von knapp 6,3 Mio. t CO₂-Äq. hatte die Nutzung von Biodiesel die größte Vermeidungswirkung im Verkehrssektor, gefolgt von Bioethanol mit circa 2,6 Mio. t CO₂-Äq.. Im Vergleich dazu ist die Verwendung von Pflanzenöl und Biomethan nahezu vernachlässigbar, wie in Abbildung 7 dargestellt. Betrachtet man die spezifischen Treibhausgasemissionen in Form von Vermeidungsfaktoren, dargestellt in Abbildung 8, ergibt sich ein differenzierteres Bild der betrachteten Energieträger.

Es zeigt sich, dass der Netto-Vermeidungsfaktor von Biodiesel mit 210 g CO₂-Äq. / kWh höher ist als die Werte der übrigen Energieträger. Dies ist vor allem auf den Brutto-Vermeidungsfaktor zurückzuführen. Im Vergleich dazu werden die geringsten spezifischen Treibhausgasemissionen pro produzierter Stromeinheit (im Diagramm auf der linken Seite in Rot dargestellt) durch die Nutzung von Biomethan verursacht (47 g CO₂-Äq. / kWh). Pflanzenöl verursacht mit 128 g CO₂-Äq. / kWh die meisten Emissionen, gefolgt von Biodiesel (91 g CO₂-Äq. / kWh) und Bioethanol (88 g CO₂-Äq. / kWh). Es lässt sich festhalten, dass der Verkehrssektor auf Basis von Biokraftstoffen absolut und relativ die geringsten Treibhausgasemissionen vermeidet.

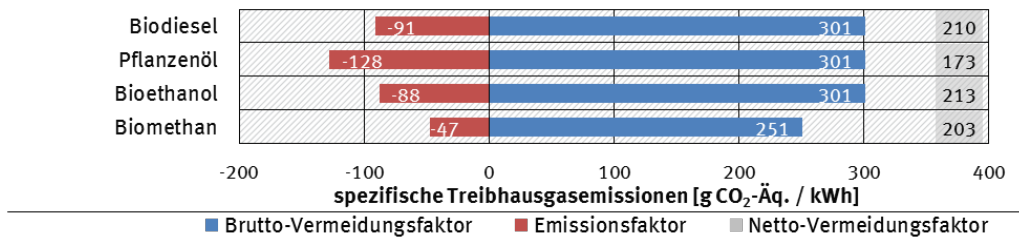
Insgesamt ist einzuschätzen, dass aufgrund der in der Regel stattfindenden Verwendung der regionalen NUTS2-Werte für den Biomasseanbau und der bislang praktizierten Bilanzierung des Methanoleinsatzes bei der Biodieselherstellung sowie der Vorgaben zur Substitution von fossilen CO₂ durch bei der Bioethanolproduktion entstehendes biogenes CO₂ die Emissionsminderungen des Biokraftstoffeinsatzes zu optimistisch ausgewiesen werden.

Abbildung 7: Durch die Nutzung von erneuerbaren Energien im Verkehrssektor vermiedene und verursachte Treibhausgasemissionen im Jahr 2016 nach Energieträgern



Quelle: Eigene Darstellung des UBA

Abbildung 8: Spezifische Treibhausgasemissionen durch die Nutzung von erneuerbaren Energien im Verkehrssektor im Jahr 2016 nach Energieträgern



Quelle: Eigene Darstellung des UBA

3.2 Emissionsvermeidung wesentlicher Luftschadstoffe

Neben den im vorherigen Kapitel 3.1 betrachteten Treibhausgasen werden in der vorliegenden Bilanz auch die Emissionen von Schwefeldioxid (SO₂), Stickstoffoxiden (NO_x), Staub, Kohlenmonoxid (CO) und flüchtigen organischen Verbindungen (NMVOC) berücksichtigt, die insbesondere wegen ihrer negativen Wirkungen auf Umwelt und Gesundheit von Bedeutung sind. Tabelle 5 gibt die Vermeidungsfaktoren und die vermiedenen Emissionen der betrachteten Luftschadstoffe aufgliedert nach Sektoren an.

Tabelle 5: Emissionsvermeidung wesentlicher Luftschadstoffe durch erneuerbare Strom-, Wärme- und Kraftstoffbereitstellung im Jahr 2016

Luftschadstoff	EE-Brutto-Stromerzeugung		EE-Wärmebereitstellung		EE-Verbrauch im Verkehr ¹⁵		Gesamt netto vermiedene Emissionen [1.000 t]	
	Netto-Vermeidungsfaktor [g/kWh]	netto vermiedene Emissionen [1.000 t]	Netto-Vermeidungsfaktor [g/kWh]	netto vermiedene Emissionen [1.000 t]	Netto-Vermeidungsfaktor [g/kWh]	netto vermiedene Emissionen [1.000 t]		
Versauerung ¹⁶	SO ₂ -Äq.	0,19	35,4	-0,05	-8,3	-0,12	-3,68	23
	NO _x	0,07	12,2	-0,19	-30,0	-0,19	-5,83	-24
	SO ₂	0,14	26,9	0,08	12,6	0,01	0,41	40
Ozon ¹⁷ Staub ¹⁸	Staub	>0,01	0,6	-0,13	-21,5	-0,01	-0,26	-21
	CO	-0,43	-81,1	-3,49	-562,9	-0,02	-0,53	-645
	NMVOC	>0,01	-0,4	-0,19	-31,4	0,03	0,77	-31

Quelle: Eigene Berechnung des UBA

Im Bereich der Stromerzeugung treten bei den Vorläufersubstanzen für bodennahes Ozon insbesondere bei Kohlenmonoxid negative Netto-Bilanzwerte (also zusätzlich verursachte Emissionen) auf. Diese werden insbesondere bei der Herstellung von PV-Modulen und der Verstromung gasförmiger Biomassen verursacht. Demgegenüber stehen signifikante Netto-Emissionsvermeidungen bei den Schadstoffen mit Versauerungspotenzial (SO₂, NO_x). Dies ist v. a. darauf zurückzuführen, dass bis auf bei der Nutzung von Biogas nur wenige biogene Energieträger zur Stromerzeugung eingesetzt werden, bzw. überwiegend erneuerbare Energiequellen genutzt werden, die nicht brennstoffbezogen sind und somit ohne emissionsreiche Rohstoffgewinnungs- und Verbrennungsprozesse auskommen.

Entsprechend ergeben sich im Bereich der Wärmeerzeugung deutlich höhere Emissionen durch Luftschadstoffe, da hier überwiegend biogene Rohstoffe in Verbrennungsprozessen zum Einsatz kommen. Die Emissionscharakteristiken können sich jedoch - je nach Anwendungsbereich - erheblich unterscheiden, weshalb insbesondere bei der Bilanzierung fester Biomasse zwischen der Wärmeerzeugung in privaten Haushalten, sowie zwischen der Industrie und Energiewirtschaft differenziert wird (vgl.

¹⁵ nur Biokraftstoffe, ohne Berücksichtigung des erneuerbaren Stromverbrauchs im Verkehrssektor

¹⁶ weitere Luftschadstoffe mit Versauerungspotenzial (NH₃, HCl, HF) sind nicht berücksichtigt

¹⁷ CO und NMVOC sind wichtige Vorläufersubstanzen für bodennahes Ozon, das wesentlich zum „Sommersmog“ beiträgt

¹⁸ Staub umfasst hier die Gesamtemissionen an Schwebstaub aller Partikelgrößen

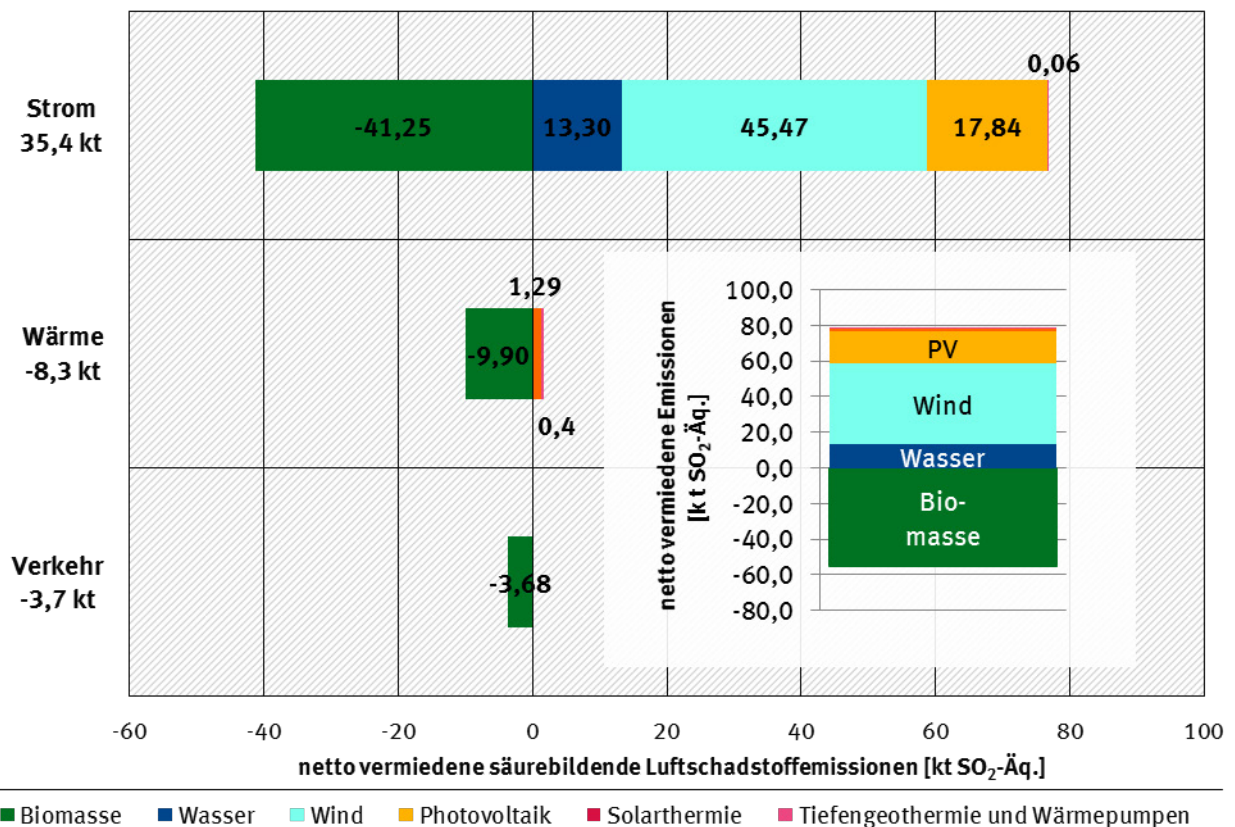
Abbildung 10 und Abbildung 11). In der Netto-Bilanz fallen v. a. die negativen Werte bei Kohlenmonoxid, Stickoxiden, flüchtigen organischen Verbindungen sowie bei Staub auf. Bei den Biokraftstoffen zeigen sich negative Auswirkungen insbesondere hinsichtlich zusätzlich verursachter Emissionen von Stickoxid und Kohlenmonoxid.

3.2.1 Säurebildende Emissionen

Abbildung 9 gibt einen Überblick über die vermiedenen und verursachten säurebildenden Emissionen durch den Einsatz erneuerbarer Energien im Jahr 2016. Die Netto-Gesamtbilanz fällt mit einer vermiedenen Menge von 23.479 t SO₂-Äq. positiv aus, wenngleich es deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Sektoren gibt.

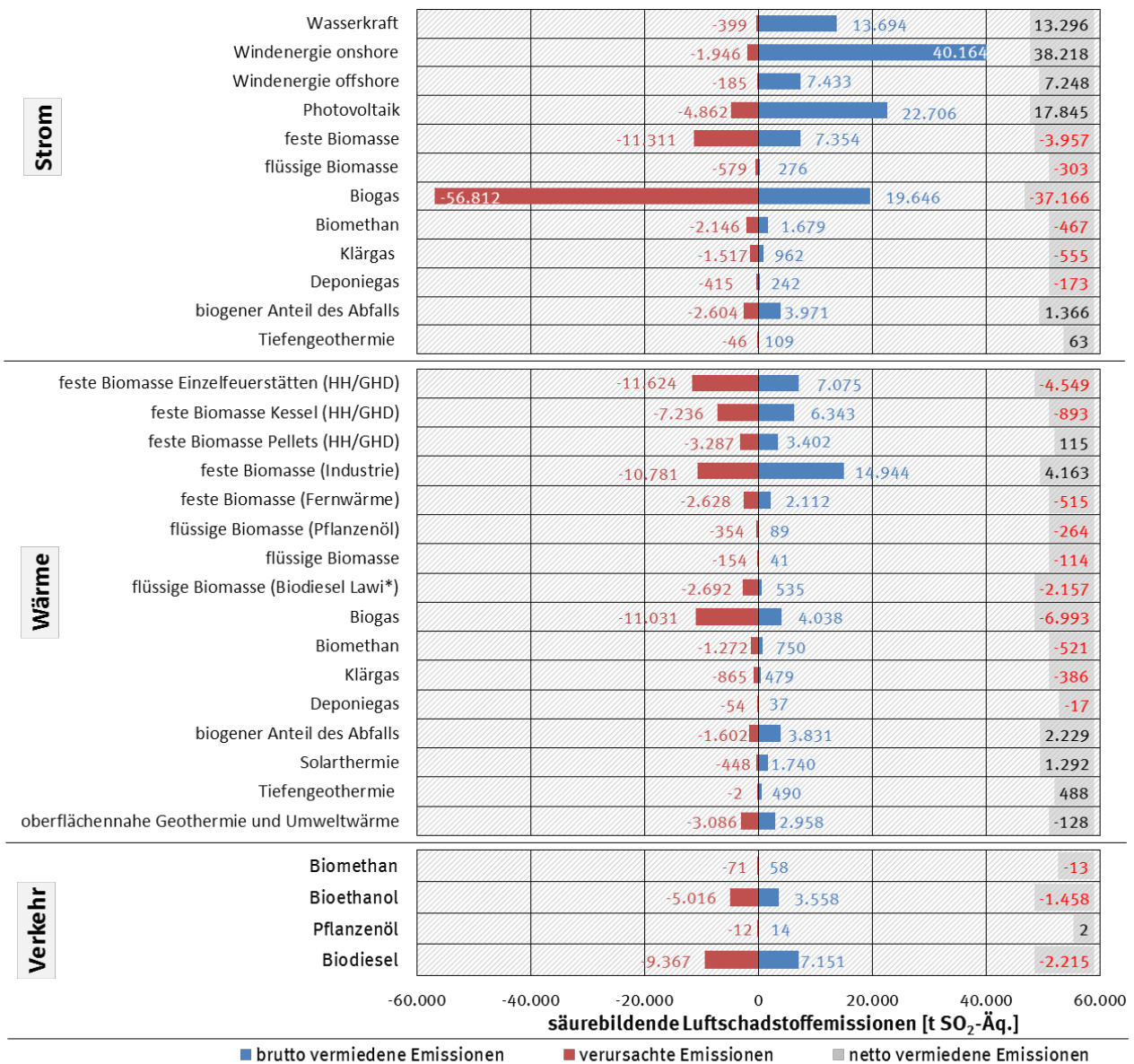
Während im Stromsektor die Netto-Bilanz im Jahr 2016 insbesondere durch den Einsatz von Windenergie, Wasserkraft und Photovoltaik mit einer Vermeidung von 35.415 t SO₂-Äq. deutlich positiv ausfiel, wirkte sich der Einsatz von Biomasse im Strom-, Wärme- und Verkehrssektor negativ aus. Hier wurden in der Netto-Bilanz zusätzliche Emissionen von 41.250 t SO₂-Äq. im Strom- und 9.900 t SO₂-Äq. im Wärmesektor, sowie 3.680 t SO₂-Äq. im Verkehrssektor verursacht. So stehen in der Bilanz für das Jahr 2016 insgesamt den durch die Nutzung von Biomasse zusätzlich verursachten, versauernd wirkenden Emissionen in Höhe von 54.100 t SO₂-Äq. Emissionsvermeidungen durch die Nutzung von Solar-, Wind-, Wasser- und Geothermieressourcen in Höhe von 78.300 t SO₂-Äq. gegenüber.

Abbildung 9: Netto vermiedene säurebildende Luftschadstoffemissionen durch die Nutzung erneuerbarer Energien im Jahr 2016



Quelle: Eigene Darstellung des UBA

Abbildung 10: Durch den Einsatz erneuerbarer Energien im Strom-, Wärme sowie Verkehrssektor im Jahr 2016 vermiedene und verursachte säurebildende Schadstoffemissionen nach Energieträgern



* Lawi-Landwirtschaft

Quelle: Eigene Darstellung des UBA

Abbildung 10 gibt einen Überblick über die Emissionsbilanzen der säurebildenden Schadstoffe für die einzelnen Technologien und Energieträger im Strom-, Wärme und Verkehrsbereich.

Den größten Anteil zur Nettovermeidung im Stromsektor trug die Nutzung von Windenergie an Land (onshore) mit knapp über 38 kt SO₂-Äq. bei. Die höchsten zusätzlichen Emissionen wurden durch die Stromerzeugung aus Biogas in fast identischer Höhe von 37 kt SO₂-Äq. verursacht.

Im Wärmesektor wurde die höchste Netto-Vermeidung durch die Nutzung fester Biomasse im Industriebereich mit mehr als 4 kt SO₂-Äq. erreicht. Die höchsten zusätzlichen netto Emissionen wurden wiederum durch die Nutzung von Biogas und Biomethan mit 7 kt SO₂-Äq. verursacht.

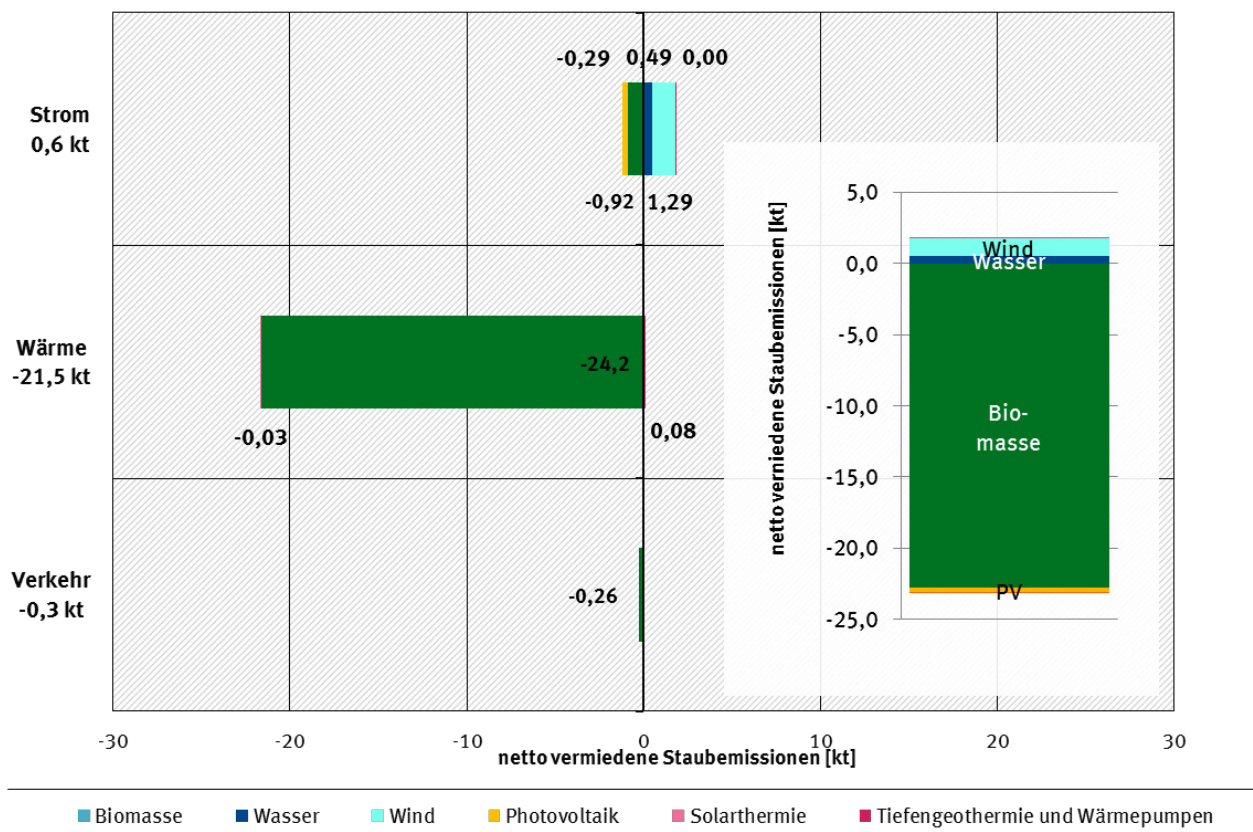
Die Nutzung von Biomasse im Verkehrssektor hat, mit Ausnahme vom Energieträger Pflanzenöl, eine negative Emissionsbilanz bezogen auf säurebildende Schadstoffe. So werden z.B. durch die Biodiesel-nutzung 2,2 kt SO₂-Äq mehr säurebildende Luftschadstoffemissionen ausgestoßen.

3.2.2 Staubemissionen

Die Netto-Gesamtbilanz der Staubemissionen (Abbildung 11) fällt insgesamt negativ aus, d. h. der Einsatz erneuerbarer Energien führte im Jahr 2016 zu erhöhten Staubemissionen von insgesamt ca. 21.240 t. Davon wurden ca. 21.600 t im Wärme-, 920 t im Verkehrs- und 260 t im Stromsektor verursacht.

Über alle Sektoren wurden durch die Nutzung von Biomassen insgesamt ca. 22.800 t Staubemissionen verursacht. Bedeutsame Emissionsvermeidungen wurden lediglich durch die Energieerzeugung aus Windenergie (ca. 1.292 t) und Wasserkraft (ca. 491 t) erreicht.

Abbildung 11: Netto vermiedene und verursachte Staubemissionen durch die Nutzung erneuerbarer Energien im Jahr 2016



Quelle: Eigene Darstellung des UBA

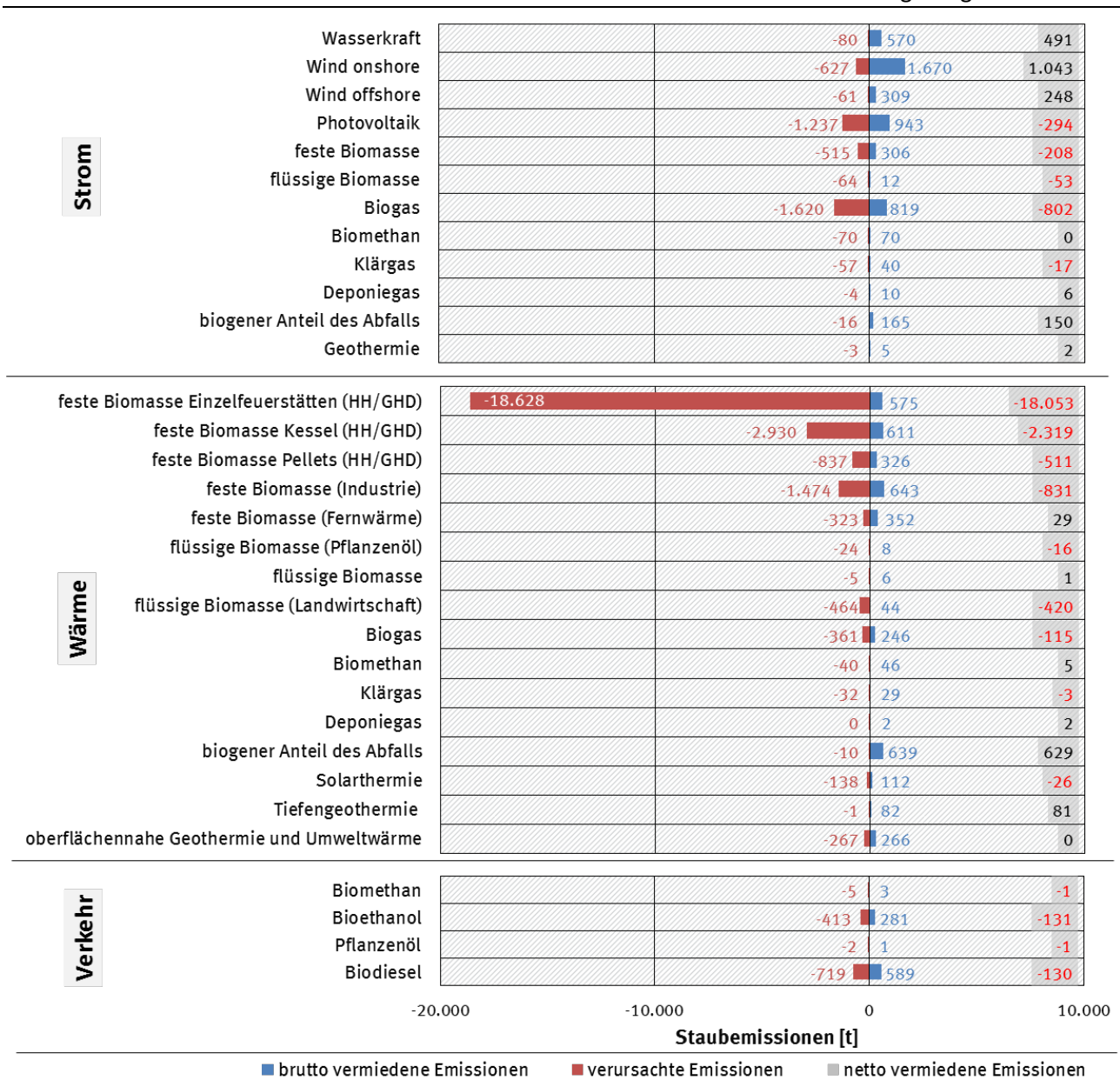
Abbildung 12 gibt einen Überblick über die Staubemissionsbilanzen der einzelner Technologien bzw. Energieträger im Strom-, Wärme- und Verkehrssektor.

Im Stromsektor wurden im Jahr 2016 insbesondere durch die Biogasverstromung Staubemissionen in Höhe von rund 802 t netto verursacht, gefolgt von der Stromerzeugung aus Photovoltaik (knapp 300 t netto) und fester Biomasse (ca. 210 t netto). Die größte Nettovermeidung an Staubemissionen wurde durch die Stromerzeugung aus Windenergie an Land (onshore) mit mehr als 1.000 t erreicht, gefolgt von Wasserkraft (ca. 490 t) und dem biogenen Anteil des Abfalls (ca. 150 t).

Der Großteil der Staubemissionen im Jahr 2016 wurde allerdings durch die Nutzung von fester Biomasse zur Wärmeerzeugung verursacht (ca. 21.700 t netto). Der Hauptanteil davon entfiel auf die Nutzung in Einzelfeuerungsanlagen der privaten Haushalte bzw. dem GHD-Sektor (ca. 18.600 t netto). Demgegenüber hat die Wärmeerzeugung aus biogenem Abfall, Deponiegas und Tiefengeothermie zusammen nur etwa 712 t (netto) an Staubemissionen vermieden. Der Verkehrssektor weist für alle Nutzungsmöglichkeiten eine nachteilige Staubbilanz auf, sodass ca. 260 t Staub mehr emittiert wurden.

Allerdings muss hier zusätzlich berücksichtigt werden, dass durch die beschriebene Reduzierung der Säurebildner (Stickoxide und v. a. Schwefeldioxid) auch die Bildung von sekundärem Feinstaub deutlich vermindert wird. Die Erhöhung der primären Staubemissionen im Rahmen der Energiewende führt daher nicht zwangsläufig zu einer Erhöhung der Feinstaubkonzentrationen in der Umgebungsluft, die sich aus primärem und sekundärem Feinstaub zusammensetzen.

Abbildung 12: Durch den Einsatz erneuerbarer Energien im Strom-, Wärme sowie Verkehrssektor im Jahr 2016 vermiedene und verursachte Staubemissionen nach Energieträgern

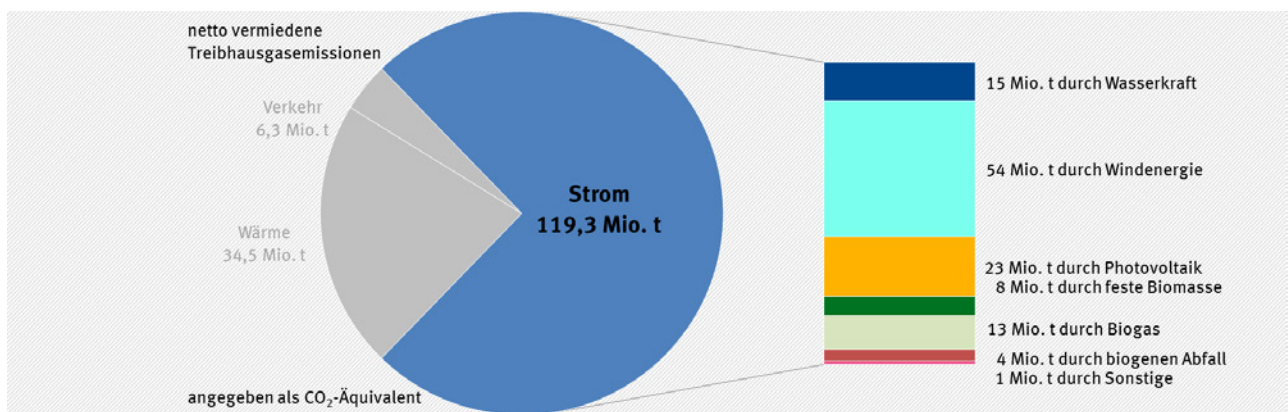


Quelle: Eigene Darstellung des UBA

4 Erneuerbare Energien im Stromsektor

Durch den Einsatz von erneuerbaren Energien im Stromsektor wurden im Jahr 2016 Treibhausgasemissionen in Höhe von insgesamt 119,3 Mio. t CO₂-Äq. vermieden. Von den drei untersuchten Sektoren (Strom, Wärme und Verkehr) trug die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien zu ca. 75 Prozent zur Netto-Gesamtemissionsvermeidung an Treibhausgasen bei. Die größten Emissionsvermeidungen wurden durch die Stromerzeugung aus Windenergie (69 Mio. t CO₂-Äq.) und aus Photovoltaik (23 Mio. t CO₂-Äq.) erreicht, gefolgt von der Stromerzeugung aus den verschiedenen Arten der Biomasse (zusammen ca. 21 Mio. t CO₂-Äq.) und Wasserkraft (15 Mio. t CO₂-Äq.) (siehe Abbildung 13).

Abbildung 13: Anteil der EE-Bruttostromerzeugung an den netto vermiedenen THG-Gesamtemissionen durch die Nutzung erneuerbarer Energien



Quelle: Eigene Darstellung

In den folgenden Abschnitten werden die Emissionsbilanzen für die Stromerzeugung aus Photovoltaik, Windenergie (on- und offshore), Wasserkraft, Tiefengeothermie, fester, flüssiger und gasförmiger Biomasse, Klär- und Deponiegas sowie dem biogenen Anteil des Siedlungsabfalls einzeln dargestellt. Diese Unterkapitel sind dabei stets gleich aufgebaut: Nach einer kurzen Einleitung werden die jeweils spezifischen Eingangsparameter der Energiebereitstellung sowie der Substitutions- und Emissionsfaktoren erläutert (vgl. auch Kapitel 2.2), bevor die Ergebnisse der Emissionsbilanz des jeweiligen erneuerbaren Energieträgers anhand der in Kapitel 2.1 erläuterten Methodik dargestellt werden.

Zur besseren Einordnung der Ergebnisse werden vorweg die Emissionsfaktoren (Tabelle 6) nach direkten Emissionsfaktoren und Emissionsfaktoren aus der Vorkette inkl. fremdbezogener Hilfsenergie aufgeteilt, sowie die dazugehörigen mittleren Brutto-Nutzungsgrade (Tabelle 7) der verdrängten konventionellen Stromerzeugung dargestellt. Diese wurden auf Basis des Nationalen Emissionsinventars (UBA, 2017) abgeleitet und durch die entsprechenden Vorketten der Brennstoffgewinnung und -bereitstellung aus GEMIS 4.94 (IINAS, 2016) ergänzt.

Tabelle 6: Mittlere Brutto-Nutzungsgrade der Stromerzeugung aus konventionellen Energieträgern (Mittelung von Kondensations- und KWK-Betrieb)

	Kernenergie [%]	Braunkohle [%]	Steinkohle [%]	Gas [%]	Öl [%]
Brutto-Nutzungsgrad	33	39	41	57	38

Quelle: UBA auf Basis von Destatis (Destatis, 2016)

Tabelle 7: Emissionsfaktoren¹⁹ der Stromerzeugung aus konventionellen Energieträgern

	CO ₂ - Äq.	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	SO ₂ - Äq.	SO ₂	NO _x	Staub	CO	NMVOC
		[g/kWh]				[g/kWh]			[g/kWh]	
Kernenergie										
VK inkl. Hilfsenergie	22,37	21,39	0,03	0,00	0,06	0,02	0,06	0,01	0,04	0,00
Direkte	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Braunkohle										
VK inkl. Hilfsenergie	10,48	10,19	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00
Direkte	402,67	398,86	0,00	0,01	0,42	0,23	0,26	0,01	0,16	0,00
Steinkohle										
VK inkl. Hilfsenergie	52,86	17,50	1,41	0,00	0,04	0,02	0,03	0,00	0,03	0,00
Direkte	338,01	336,64	0,00	0,00	0,31	0,17	0,20	0,01	0,02	0,01
Gas										
VK inkl. Hilfsenergie	34,83	22,59	0,48	0,00	0,08	0,01	0,10	0,01	0,08	0,01
Direkte	209,30	201,37	0,27	0,00	0,11	0,00	0,16	0,00	0,06	0,00
Öl										
VK inkl. Hilfsenergie	46,71	44,20	0,09	0,00	0,20	0,12	0,12	0,02	0,09	0,04
Direkte	268,70	266,47	0,02	0,01	0,68	0,17	0,74	0,02	0,18	0,01

Quelle: (UBA, 2017), GEMIS 4.94 (IINAS, 2016)

4.1 Photovoltaik

Die photovoltaische Stromerzeugung hat sich sehr dynamisch entwickelt und ist von einer Nischenanwendung zu einer der Hauptsäulen der erneuerbaren Stromerzeugung in Deutschland geworden. Wurden im Jahr 2000 nur 60 GWh Strom aus Photovoltaikanlagen erzeugt, so waren es im Jahr 2016 bereits über 38.000 GWh. Nach den Jahren des starken Wachstums hat sich allerdings der Zubau installierter Leistung in den letzten Jahren deutlich verlangsamt und liegt mit etwa 1.500 MW im Jahr 2016 deutlich hinter den Spitzenjahren 2010 bis 2012 mit einem Zubau von jeweils etwa 7.500 MW zurück.

Es gibt eine Vielzahl von Materialien und Konzepten für Solarzellen mit unterschiedlichen Formen, Farben und Leistungsdaten. Meist unterscheidet man zwischen kristallinen Siliziumzellen (monokristallin, polykristallin) und Dünnschichtzellen (unter anderem amorphes Silizium, Cadmium-Tellurid, Kupfer-Indium-Diselenid). Perspektivisch kommen organische Solarzellen hinzu, die ein aktuelles Forschungsthema sind. Kristalline Siliziumzellen sind mit Abstand am weitesten verbreitet, haben einen

¹⁹ Vkl. inkl. Hilfsenergie – Emissionsfaktor der Vorkette inkl. fremdbezogener Hilfsenergie, Direkte – Emissionsfaktoren aus dem direkten Anlagenbetrieb

Marktanteil von zusammen mehr als 90 % (ISE, 2016) und können damit als repräsentativ für die folgenden Berechnungen angenommen werden.

4.1.1 Energiebereitstellung

Die Angabe zur Bruttostromerzeugung aus Photovoltaik wird von der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energie Statistik (AGEE-Stat) übernommen (vgl. Kapitel 2.2.1). Der in Tabelle 8 angegebene Datenstand entspricht der BMWi-Publikation „Erneuerbare Energie in Zahlen - Nationale und internationale Entwicklung“ (BMWi, 2017) die jährlich im September/Oktober publiziert wird. Zusätzlich erfolgt zum Jahresende sowie zum Februar/März eine Datenaktualisierung²⁰. Methodische Details zur Stromerzeugung aus Photovoltaik können der Dokumentation „Datenquellen und Methodik der AGEE-Stat-Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland“ (UBA, 2016) entnommen werden.

Tabelle 8: Stromerzeugung aus Photovoltaik

	2016 [GWh]
Photovoltaik	38.095

Quelle: (AGEE-Stat, 2017)

4.1.2 Substitutionsfaktoren

Die Substitutionsfaktoren für Photovoltaikstrom werden mithilfe einer ex-post-Simulation vom Fraunhofer ISI ermittelt (vgl. Kapitel 2.2.6 und (ISI, 2016)). Aktuell liegen die gemittelten Substitutionsfaktoren der Stromerzeugung des Jahres 2013 vor (vgl. Tabelle 9). Diese werden vorläufig fortgeschrieben.

Entscheidend für den Substitutionsfaktor der PV ist das stark fluktuierende Erzeugungsprofil mit ausgeprägten tageszeitlichen und saisonalen Unterschieden. Entsprechend ersetzt PV hauptsächlich Steinkohle- (zu 59 %) und Erdgas-Kraftwerke (zu 41 %). Aufgrund der Stellung in der deutschen (und europäischen) Merit-Order wird weder Strom aus Braunkohle noch aus Kernenergie verdrängt.

Tabelle 9: Substitutionsfaktoren der Stromerzeugung aus Photovoltaik

	Kernenergie [%]	Braunkohle [%]	Steinkohle [%]	Gas [%]	Öl [%]
Photovoltaik	0,0	0,0	59,0	41,0	0,0

Quelle: (ISI, 2016)

Da bei hohen Anteilen fluktuierender Erzeugung aus Wind und PV in gewissem Umfang Kapazitäten zur Ausregelung von Prognosefehlern vorgehalten werden müssen, wird ein pauschaler Abschlag von 7 Prozent in die Emissionsbilanz von PV eingeführt. Darin drückt sich aus, dass die regelbaren Kraftwerke vermehrt im Teillastbereich gefahren werden, was mit entsprechenden Wirkungsgradverlusten und Emissionen einhergeht (vgl. (Roth, Brückl, & Held, 2005) und (Wagner, et al., 2004)). Eine Untersuchung im Auftrag von VGB Powertech e. V. kommt allerdings zu dem Ergebnis, dass sich der mittlere Jahreswirkungsgrad von Steinkohle- und GuD-Erdgaskraftwerken im Jahr 2023 um lediglich ca. 2 Prozent bis 3 Prozent verringern wird (Ziems, Meinke, Nocke, Weber, & Hassel, 2012). Aus Gründen einer konservativen Vorgehensweise wird gleichwohl an den 7 Prozent festgehalten.

²⁰ Die aktuellen Daten in der Zeitreihe ab 1990 sind abrufbar unter: http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Naviga-tion/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html

Die vermiedenen Brutto- Emissionen der Stromerzeugung aus Photovoltaik lassen sich aufbauend auf die dargestellten Substitutionsfaktoren mittels der Brutto-Nutzungsgrade (Mittelung von Kondensations- und KWK-Betrieb) (Tabelle 6), sowie den Emissionsfaktoren der Stromerzeugung aus konventionellen Energieträgern (Tabelle 7) berechnen.

4.1.3 Emissionsfaktoren

PV-Anlagen bestehen grundsätzlich aus folgenden Komponenten: PV-Module, Wechselrichter, Montagesystem und Verkabelung. Ein kristallines Modul besteht i. d. R. aus Solarzellen, Glas, Laminat und einem Aluminiumrahmen.

Als Lebenszyklusphasen können die Herstellungsphase bestehend aus Rohstoffabbau sowie -aufbereitung, Herstellung der Vorprodukte und der Modulproduktion, Betrieb und Rückbau (Recycling) der PV-Anlage unterschieden werden. Alle Module bestehen aus einem Trägermaterial (bspw. Glas) und photoaktiven Halbleitern. Bei kristallinen Siliziumzellen ist der Energieaufwand für die Herstellung des Halbleiters bedeutend höher als bei anderen Systemen, die mit einem geringeren Materialaufwand auskommen. Bei Si-Dünnschicht Modulen kommt allerdings die Emission von Reinigungsgasen hinzu (NF₃ mit hohem THG-Potential). Bei CdTe-Modulen kann bei der Herstellung des Halbleiters und bei unsachgerechter Entsorgung Cadmium frei gesetzt werden.

Bei den Berechnungen werden die Emissionen auf der Herstellungsseite (aus den Vorketten) und aus der benötigten fremdbezogenen Hilfsenergie berücksichtigt. Der direkte Betrieb der PV-Anlage selbst ist emissionsfrei. Des Weiteren wurde bei allen Kalkulationen der materielle Aufwand für Rahmen und Aufständigung eingerechnet. Zwischen Freiflächenanlage und Dachanlage wurde dabei nicht unterschieden. Aufwendungen für Wechselrichter und Verkabelung wurden nicht einbezogen.

Im Rahmen des BMU-Vorhabens „Aktualisierung von Ökobilanzdaten für Erneuerbare Energien im Bereich Treibhausgase und Luftschadstoffe (LCA-EE)“ (Öko-Institut, 2012) wurden Ökobilanzen für alle marktrelevanten PV-Systeme/Modul-Technologien erstellt und in GEMIS 4.94 integriert (IINAS, 2016) (SmartGreenScans, 2012)(vgl. Kapitel 2.2.4).

Die Umweltbelastungen bei der Herstellung sind nicht zuletzt vom Stromerzeugungsmix des jeweiligen Produktionslandes abhängig. Eine Gewichtung aller Einzeltechnologien entsprechend ihrer Marktanteile in Deutschland ist aufgrund fehlender Daten jedoch nicht möglich. Da polykristalline Zellen gegenwärtig den weitaus größten Marktanteil haben und bzgl. der Emissionsfaktoren einen guten Durchschnitt aller Technologien abbilden, basiert die Berechnung auf dem Datensatz für PV-Anlagen mitpolykristallinen Modulen. Wegen des modularen Aufbaus können über alle PV-Leistungsklassen hinweg gleiche Angaben zu den Emissionsfaktoren angenommen werden.

Tabelle 10: Emissionsfaktoren der Stromerzeugung aus Photovoltaik

	CO ₂ -	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	SO ₂ -	SO ₂	NO _x	Staub	CO	NMVOC
	Äq.				Äq.					
		[g/kWh]				[g/kWh]			[g/kWh]	
Vorkette	55,71	51,86	0,13	0,00	0,11	0,06	0,08	0,03	1,22	0,01
Direkte	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hilfsenergie	12,10	11,44	0,02	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00

Quelle: GEMIS 4.94 (IINAS, 2016), (Öko-Institut, 2012), (SmartGreenScans, 2012)

4.1.4 Ergebnisse der Emissionsbilanz

Die Netto-Emissionsbilanz der Stromerzeugung aus Photovoltaik errechnet sich aus den oben angegebenen Einzelgrößen. Die resultierenden Bilanzergebnisse sind in Tabelle 11 dargestellt.

Insgesamt wurden im Jahr 2016 durch die Stromerzeugung aus Photovoltaik mit einem spezifischen Vermeidungsfaktor von ca. 614 g CO₂-Äq./kWh_{el} etwa 26 Mio. t CO₂-Äq. Treibhausgase vermieden.

Das Ergebnis für die versauernd wirkenden Luftschadstoffe fällt mit rund 17.845 t vermiedenen SO₂-Äq. ebenfalls deutlich positiv aus. Nur im Bereich der Ozonvorläufersubstanzen und Staub ist die Bilanz negativ, es wurden geringfügig mehr Emissionen verursacht als vermieden.

Tabelle 11: Emissionsbilanz der Stromerzeugung aus Photovoltaik

	brutto vermiedene Emissionen ²¹ [t]	verursachte Emissionen [t]	netto vermiedene Emissionen [t]	Netto-Vermeidungs- faktor [g/kWh]
CO₂-Äq.	25.968.851	2.583.359	23.385.493	613,87
CO ₂	23.598.558	2.411.585	21.186.972	556,16
CH ₄	90.347	5.905	84.443	2,22
N ₂ O	375	81	293	0,01
SO₂-Äq.	22.706	4.862	17.845	0,47
SO ₂	9.985	2.538	7.447	0,20
NO _x	18.277	3.339	14.938	0,39
Staub	943	1.237	-294	-0,01
CO	6.289	46.755	-40.465	-1,06
NMVOG	1.004	221	783	0,02

Quelle: Eigene Berechnung

4.2 Windenergie an Land (onshore)

Windenergieanlagen nutzen die Bewegungsenergie des Windes, die durch unterschiedliche Luftdruckverhältnisse in der Nähe der Erdoberfläche entsteht. Windenergie ist in Deutschland der mit Abstand bedeutendste erneuerbare Energieträger zur Stromerzeugung. Insgesamt waren zum Jahresende 2016 an Land (onshore) etwa 27.023 Windkraftanlagen mit einer elektrischen Gesamtleistung von ca. 45.765 Megawatt in Betrieb (DEWI GmbH, 2017). Die Anlagen befinden sich schwerpunktmäßig im Norden und in der Mitte Deutschlands und sind i. d. R. in Windparks konzentriert. Aufgrund der Vergütung zunächst durch das Stromeinspeisungsgesetz (StrEG) und später das EEG, ergänzt durch Änderungen im Baurecht, nahm die einheimische Windenergienutzung seit 1990 eine dynamische Entwicklung - nicht nur beim Zubauvolumen, sondern auch bei den Anlagen selbst. Mit der deutlichen Anlagenvergrößerung und parallelen weitreichenden Anlagenoptimierungen haben sich die Ausnutzungsdauer/Effizienz und auch die Emissionsbilanz der Windkraftanlagen/-nutzung spürbar verbessert. Zudem ist der spezifische Flächenbedarf stark zurückgegangen, was u. a. mit wesentlich höheren Ausbaupotenzialen verbunden ist (UBA, 2013a).

4.2.1 Energiebereitstellung

Die Angabe zur Bruttostromerzeugung aus Windenergie an Land (onshore) wird von der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) übernommen (vgl. Kapitel 2.2.1). Der in Tabelle 12 angegebene Datenstand entspricht der BMWi-Publikation „Erneuerbare Energie in Zahlen - Nationale

²¹ unter Berücksichtigung von Emissionen durch zusätzlichen Regelenergieaufwand konv. Kraftwerke in Höhe von 7%

und internationale Entwicklung (BMWi, 2017), die jährlich im September/Oktober publiziert wird. Zusätzlich erfolgt zum Jahresende sowie zum Februar/März eine Datenaktualisierung.²²

Tabelle 12: Stromerzeugung aus Windenergie an Land (onshore)

	2016 [GWh]
Windenergie an Land	66.324

Quelle: (AGEE-Stat, 2017)

Methodische Details zur Stromerzeugung aus Windenergie an Land können der Dokumentation „Datenquellen und Methodik der AGEE-Stat-Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland“ (UBA, 2016) entnommen werden. Die Stromerzeugung aus Windenergie an Land entspricht den EEG - Jahresabrechnungen der Übertragungsnetzbetreiber. Sie setzt sich grundsätzlich aus der eingespeisten und durch die Übertragungsnetzbetreiber vermarkteten EEG-Strommenge sowie der von Anlagenbetreibern direkt vermarkteten Strommenge zusammen.

4.2.2 Substitutionsfaktoren

Die Substitutionsfaktoren für Windenergie werden mithilfe einer ex-post-Simulation vom Fraunhofer ISI ermittelt (vgl. Kapitel 2.2.6 und (ISI, 2016)). Aktuell liegen die gemittelten Substitutionsfaktoren der Stromerzeugung des Jahres 2013 vor (vgl. Tabelle 13). Diese werden vorläufig fortgeschrieben. Entscheidend bei der Stromerzeugung aus Windenergie ist das stark fluktuierende Einspeiseprofil in Abhängigkeit von den Wetterbedingungen. Bei der in der Simulation angesetzten Brennstoffpreisrelationen für Steinkohle und Gas ersetzt Windkraft hauptsächlich Steinkohlekraftwerke und in geringerem Umfang auch Erdgaskraftwerke. Aufgrund der Stellung in der deutschen und europäischen Merit-Order wird weder Strom aus Braunkohle bzw. Kernenergie verdrängt.

In der Emissionsbilanz (s.u.) werden zusätzlich auftretende Emissionen durch die in gewissem Umfang erforderliche Vorhaltung konventioneller Kapazitäten zur Ausregelung auftretender Prognosefehler mit einem pauschalen Abschlag von 7 Prozent berücksichtigt. Darin drückt sich aus, dass die regelbaren Kraftwerke vermehrt im Teillastbereich gefahren werden, was mit entsprechenden Wirkungsgradverlusten und Emissionen einhergeht (vgl. (Roth, Brückl, & Held, 2005) und (Wagner, et al., 2004)). Eine Untersuchung im Auftrag von VGB Powertech e. V. kommt allerdings zu dem Ergebnis, dass sich der mittlere Jahreswirkungsgrad von Steinkohle- und GuD-Erdgaskraftwerken im Jahr 2023 um lediglich ca. 2 bis 3 Prozent verringern wird (Ziems, Meinke, Nocke, Weber, & Hassel, 2012). Aus Gründen einer konservativen Vorgehensweise wird gleichwohl an den 7 Prozent festgehalten.

Tabelle 13: Substitutionsfaktoren der Stromerzeugung aus Windenergie an Land (onshore)

	Kernenergie [%]	Braunkohle [%]	Steinkohle [%]	Gas [%]	Öl [%]
Windenergie an Land	0,0	0,0	61	39	0,0

Quelle: (ISI, 2016)

Die vermiedenen Brutto-Emissionen der Stromerzeugung aus Windenergie an Land lassen sich aufbauend auf den dargestellten Substitutionsfaktoren mittels der Brutto-Nutzungsgrade (Mittelung von

²² Die aktuellen Daten in der Zeitreihe ab 1990 sind abrufbar unter: http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html

Kondensations- und KWK-Betrieb) (Tabelle 6) sowie den Emissionsfaktoren der Stromerzeugung aus konventionellen Energieträgern (Tabelle 7) berechnen.

4.2.3 Emissionsfaktoren

Als Lebenszyklusphasen können generell die Herstellungsphase bestehend aus Rohstoffabbau und -aufbereitung, der Produktion der Einzelkomponenten und der Errichtung, der Betrieb und der Rückbau (Recycling) der Windenergieanlage unterschieden werden. In der Analyse werden die Emissionen auf der Herstellungsseite (aus den Vorketten) und aus der benötigten fremdbezogenen Hilfsenergie berücksichtigt. Der Vorketten-Emissionsfaktor deckt dabei Materialaufwendungen in Form von Beton, Stahl, Kunststoff, Eisen-Guss, Kupfer und Aluminium ab und basiert auf der Ökobilanzdatenbank GEMIS 4.94 (vgl. Kapitel 2.2.4). Grundlage sind die im Rahmen des BMU-Vorhabens LCA-EE durch Fraunhofer IWES aktualisierten Sachbilanzen (Öko-Institut, 2012).

Die Errichtung sowie die Entsorgung und der Betrieb einer WEA verursachen im Vergleich dazu verhältnismäßig geringe Emissionen. Die Hauptsysteme einer WEA sind Rotor, Gondel, Turm und Fundament. Der Rotor besteht aus einer typischen Rotornabe aus je zur Hälfte Eisen- und Stahlguss sowie den daran befestigten Rotorblättern aus glas- oder kohlefaserverstärktem Kunststoff. Neben dem Turm ist der Rotordurchmesser entscheidend für die Bilanzierung, da er das Gewicht des Rotors bestimmt.

Zur Bilanzierung der Windenergienutzung wird der u. a. im Rahmen des Fraunhofer IWES-Fachgutachtens abgeleitete Datensatz „Bestandsanlagen“ verwendet, der alle zum 31.12.2011 in Betrieb befindliche Windkraftanlagen und sämtliche Standortkategorien (Küste, Norddeutsche Tiefebene, Mittelgebirge) abbildet (vgl. Tabelle 14).

Tabelle 14: Eingangsparmeter der betrachteten Referenz-Windkraftanlagen

Bestandsanlagen		an Land (onshore)	auf See (offshore)
Nennleistung	[kW]	1.300	3.600
Nabenhöhe	[m]	75	80
Rotordurchmesser	[m]	61	105
Volllaststunden	[h/a]	1.600	3.000
technische Lebensdauer	[a]	20	25

Quelle: (Fraunhofer IWES, 2012), GEMIS 4.94 (IINAS, 2016)

Tabelle 15: Emissionsfaktoren der Stromerzeugung aus Windenergie an Land (onshore)

Windenergie an Land	CO ₂ -Äq.	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	SO ₂ -Äq.	SO ₂	NO _x	Staub	CO	NMVOC
	[g/kWh]				[g/kWh]					
Vorkette	8,88	8,09	0,03	0,00	0,03	0,01	0,02	0,01	0,12	0,00
Direkte	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hilfsenergie	1,81	1,72	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Quelle: GEMIS 4.94 (IINAS, 2016), (Öko-Institut, 2012), (Fraunhofer IWES, 2012)

4.2.4 Ergebnisse der Emissionsbilanz

Die Netto-Emissionsbilanz der Stromerzeugung aus Windenergie an Land errechnet sich aus den oben angegebenen Einzelgrößen. Die resultierenden Bilanzergebnisse sind in Tabelle 16 dargestellt.

Von allen erneuerbaren Energieträgern liefert die Windenergie den größten Beitrag zum Klimaschutz. Durch die Stromerzeugung aus Windkraft wurden Treibhausgase in Höhe von ca. 45,85 Mio. t CO₂-Äq. vermieden. Der spezifische Vermeidungsfaktor beträgt ca. 680,62 g CO₂-Äq. / kWh_{el}. Durch den emissionsfreien Anlagenbetrieb trägt der Ausbau der Windenergie an Land aber auch zur Reduktion von Luftschadstoffen bei.

Tabelle 16: Emissionsbilanz der Stromerzeugung aus Windenergie an Land (onshore)

	brutto vermiedene Emissionen ²³ [t]	verursachte Emissionen [t]	netto vermiedene Emissionen [t]	Netto-Vermeidungs- faktor [g/kWh]
CO₂-Äq.	45.850.311	709.115	45.141.196	680,62
CO ₂	41.657.602	650.219	41.007.382	618,29
CH ₄	159.900	2.162	157.738	2,38
N ₂ O	655	16	639	0,01
SO₂-Äq.	40.164	1.946	38.218	0,58
SO ₂	17.946	946	17.000	0,26
NO _x	31.922	1.436	30.486	0,46
Staub	1.670	627	1.043	0,02
CO	10.803	8.085	2.718	0,04
NMVOG	1.750	115	1.635	0,02

Quelle: Eigene Berechnung

4.3 Windenergie auf See (offshore)

Seit dem 12. August 2009 speisen die ersten Offshore-Windenergieanlagen Strom in das deutsche Versorgungsnetz ein. Zum Jahresende 2016 waren insgesamt 968 Anlagen mit einer elektrischen Gesamtleistung von etwa 4.231 MW installiert (DEWI GmbH, 2017).

4.3.1 Energiebereitstellung

Die Angabe zur Bruttostromerzeugung aus Offshore-Windenergie wird von der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) übernommen (vgl. Kapitel 2.2.1). Der in Tabelle 17 angegebene Datenstand entspricht der BMWi-Publikation „Erneuerbare Energie in Zahlen - Nationale und internationale Entwicklung (BMWi, 2017), die jährlich im September/Oktober publiziert wird. Zusätzlich erfolgt zum Jahresende sowie zum Februar/März eine Datenaktualisierung.²⁴

Methodische Details zur Stromerzeugung aus Windenergie auf See (offshore) können der Dokumentation „Datenquellen und Methodik der AGEE-Stat-Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland“ (UBA, 2016) entnommen werden. Die Stromerzeugung aus Windenergie auf See entspricht den EEG - Jahresendabrechnungen der Übertragungsnetzbetreiber. Sie setzt sich zusammen

²³ unter Berücksichtigung von Emissionen durch zusätzlichen Regelenergieaufwand konv. Kraftwerke in Höhe von 7%

²⁴ Die aktuellen Daten in der Zeitreihe ab 1990 sind abrufbar unter: http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html

aus der eingespeisten und von den Übertragungsnetzbetreibern vermarkteten EEG-Strommenge und dem direkt vermarkteten Strom.

Tabelle 17: Stromerzeugung aus Windenergie auf See (offshore)

	2016 [GWh]
Windenergie auf See	12.274

Quelle: (AGEE-Stat, 2017)

4.3.2 Substitutionsfaktoren

Die Substitutionsfaktoren für Windenergie werden mithilfe einer ex-post-Simulation vom Fraunhofer ISI ermittelt (vgl. Kapitel 2.2.6 und (ISI, 2016)). Aktuell liegen die gemittelten Substitutionsfaktoren der Stromerzeugung im Jahr 2013 vor (vgl. Tabelle 18). Diese werden vorläufig fortgeschrieben.

Entscheidend bei der Stromerzeugung aus Windenergie ist das stark fluktuierende Einspeiseprofil in Abhängigkeit von den Windverhältnissen. Bei der in der Simulation angesetzten Brennstoffpreisrelationen ersetzt Windkraft hauptsächlich Steinkohle- und Erdgaskraftwerke. Aufgrund der Stellung in der deutschen und europäischen Merit-Order wird weder Strom aus Braunkohle bzw. Kernenergie verdrängt.

In der Emissionsbilanz (s. u.) werden zusätzliche Emissionen durch die in gewissem Umfang erforderliche Vorhaltung konventioneller Kapazitäten zur Ausregelung auftretender Prognosefehler mit einem pauschalen Abschlag von 7 Prozent berücksichtigt. Darin drückt sich aus, dass die regelbaren Kraftwerke vermehrt im Teillastbereich gefahren werden, was mit entsprechenden Wirkungsgradverlusten und Emissionen einhergeht (vgl. (Roth, Brückl, & Held, 2005) und (Wagner, et al., 2004)). Eine Untersuchung im Auftrag von VGB Powertech e. V. kommt allerdings zu dem Ergebnis, dass sich der mittlere Jahreswirkungsgrad von Steinkohle- und GuD-Erdgaskraftwerken im Jahr 2023 um lediglich ca. 2 bis 3 Prozent verringern wird (Ziems, Meinke, Nocke, Weber, & Hassel, 2012). Aus Gründen einer konservativen Vorgehensweise wird gleichwohl an den 7 Prozent festgehalten.

Die vermiedenen Brutto-Emissionen der Stromerzeugung aus Windenergie auf See lassen sich aufbauend auf den dargestellten Substitutionsfaktoren mittels der Brutto-Nutzungsgrade (Mittelung von Kondensations- und KWK-Betrieb) (Tabelle 6) sowie den Emissionsfaktoren der Stromerzeugung aus konventionellen Energieträgern (Tabelle 7) berechnen.

Tabelle 18: Substitutionsfaktoren der Stromerzeugung aus Windenergie auf See (offshore)

	Kernenergie [%]	Braunkohle [%]	Steinkohle [%]	Gas [%]	Öl [%]
Windenergie auf See	0,0	0,0	61	39	0,0

Quelle: (ISI, 2016)

4.3.3 Emissionsfaktoren

Die Ökobilanz einer Offshore-Windenergieanlage unterscheidet sich grundsätzlich nicht wesentlich von der einer Windenergieanlage an Land (vgl. Kapitel 2.2.4). Zusätzliche Relevanz haben jedoch der hohe Materialeinsatz (i. d. R. Stahl und Beton) für die Gründung sowie die höheren energetischen Aufwendungen für Instandhaltung und Wartung der Anlage (Lohmann, et al., 2012). Die verwendeten Vorketten-Emissionsfaktoren für Offshore-Windenergie basieren auf der Ökobilanzdatenbank GEMIS 4.94. Grundlage sind die im Rahmen des BMU-Vorhabens LCA-EE (Fraunhofer IWES, 2012) aktualisierten Sachbilanzen für eine Offshore-Windenergieanlage (Öko-Institut, 2012). Die Verkabelungen

innerhalb des Offshore-Windparks, die Umspannstation sowie die Anbindung an das Festland sind in diesem Datensatz jedoch nicht berücksichtigt. Darüber hinaus werden Emissionen aus der für den Produktionsprozess benötigten fremdbezogenen Hilfsenergie berücksichtigt.

Tabelle 19: Emissionsfaktoren der Stromerzeugung aus Windenergie auf See (offshore)

Windenergie auf See	CO ₂ -Äq.	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	SO ₂ -Äq.	SO ₂	NO _x	Staub	CO	NMVOC
		[g/kWh]				[g/kWh]			[g/kWh]	
Vorkette	4,37	3,95	0,02	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,07	0,00
Direkte	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hilfsenergie	1,81	1,72	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Quelle: GEMIS 4.94 (IINAS, 2016), (Öko-Institut, 2012), (Fraunhofer IWES, 2012)

4.3.4 Ergebnisse der Emissionsbilanz

Die Netto-Emissionsbilanz der Stromerzeugung aus Windenergie auf See (offshore) errechnet sich aus den oben angegebenen Einzelgrößen. Die resultierenden Bilanzergebnisse sind in Tabelle 20 dargestellt.

Die Stromerzeugung der deutschen Offshore-Windparks vermied Treibhausgasemissionen in Höhe von ca. 8,4 Mio. t CO₂-Äq. Der spezifische Vermeidungsfaktor liegt bei ca. 685 g CO₂-Äq./kWh_{el}. Durch den emissionsfreien Betrieb der Anlagen werden darüber hinaus auch Luftschadstoffe vermieden.

Tabelle 20: Emissionsbilanz der Stromerzeugung aus Windenergie auf See (offshore)

	brutto vermiedene Emissionen ²⁵ [t]	verursachte Emissionen [t]	netto vermiedene Emissionen [t]	Netto-Vermeidungsfaktor [g/kWh]
CO₂-Äq.	8.484.997	75.911	8.409.086	685,12
CO₂	7.709.100	69.526	7.639.573	622,43
CH₄	29.591	235	29.356	2,39
N₂O	121	2	120	0,01
SO₂-Äq.	7.433	185	7.248	0,59
SO₂	3.321	95	3.226	0,26
NO_x	5.907	130	5.778	0,47
Staub	309	61	248	0,02
CO	1.999	857	1.142	0,09
NMVOC	324	9	315	0,03

Quelle: eigene Berechnungen

4.4 Wasserkraft

Wasserkraftanlagen nutzen die kinetische und potentielle Energie des Wassers zur Stromerzeugung. Dabei werden drei Anlagentypen unterschieden: Laufwasserkraftwerke, Speicherkraftwerke und

²⁵ unter Berücksichtigung von Emissionen durch zusätzlichen Regelernergieaufwand konv. Kraftwerke in Höhe von 7%

Pumpspeicherkraftwerke. Die Größe der in Deutschland installierten Wasserkraftanlagen variiert stark, von weniger als 1 Kilowatt elektrische Leistung bis hin zu 100 Megawatt. Art, Größe, Ausnutzung und Effizienz der Wasserkraftanlagen stehen im engen Kontext zum Wasserdurchfluss und zur Fallhöhe und beeinflussen wesentlich Baukörper, Turbinenform sowie auch die Höhe der (vorgelagerten) Emissionen der Wasserkraftnutzung.

Der im Vergleich zu den anderen erneuerbaren Energieträgern seit 1990 relativ geringe Nettoleistungszuwachs von etwas über 1.600 Megawatt erfolgte vornehmlich im Zuge einer Standortreaktivierung bzw. Anlagenmodernisierung und steht auch im Kontext zu den begrenzten Ausbaupotenzialen und konkurrierenden Nutzungsansprüchen, z. B. der Verbesserung des ökologischen Zustandes der Fließgewässer.

4.4.1 Energiebereitstellung

Die Angabe zur Bruttostromerzeugung aus Wasserkraft wird von der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) übernommen (vgl. Kapitel 2.2.1). Der in Tabelle 21 angegebene Datenstand entspricht der BMWi-Publikation „Erneuerbare Energie in Zahlen - Nationale und internationale Entwicklung (BMWi, 2017), die jährlich im September/Oktobre publiziert wird. Zusätzlich erfolgt zum Jahresende sowie zum Februar/März eine Datenaktualisierung²⁶.

Methodische Details zur Stromerzeugung aus Wasserkraft können der Dokumentation „Datenquellen und Methodik der AGEE-Stat-Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland“ (UBA, 2016) entnommen werden.

Die Stromerzeugung aus Wasserkraft setzt sich zusammen aus der Brutto-Stromerzeugung in Kraftwerken der öffentlichen Versorgung sowie in den Kraftwerken der Industrie. Hinzu kommt noch die Stromeinspeisung aus Anlagen „dritter“ Betreiber, die energiestatistisch lediglich über die Erhebung bei den Netzbetreibern erfasst werden.

Tabelle 21: Stromerzeugung aus Wasserkraft

	2016 [GWh]
Wasserkraft	20.546
Laufwasser	19.348
Speicherwasser, Pumpspeicherwasser - mit natürlichem Zufluss	1.198

Quelle: (AGEE-Stat, 2017)

4.4.2 Substitutionsfaktoren

Die Substitutionsfaktoren für Wasserkraft werden mithilfe einer ex-post-Simulation von Fraunhofer ISI ermittelt (ISI, 2016). Aktuell liegen die gemittelten Substitutionsfaktoren der Stromerzeugung des Jahres 2013 vor (vgl. Tabelle 22).

Entscheidend bei Wasserkraft ist das gleichmäßige Einspeiseprofil mit saisonalen Unterschieden. Bei den derzeitigen Brennstoffpreisrelationen ersetzt Wasserkraft hauptsächlich Steinkohle- und Erdgas-kraftwerke. Aufgrund der Stellung in der deutschen und europäischen Merit-Order wird weder Strom aus Braunkohle bzw. Kernenergie verdrängt.

²⁶ Die aktuellen Daten in der Zeitreihe ab 1990 sind abrufbar unter: http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html

Die vermiedenen Brutto-Emissionen der Stromerzeugung aus Wasserkraft lassen sich aufbauend auf den dargestellten Substitutionsfaktoren mittels der Brutto-Nutzungsgrade (Mittelung von Kondensations- und KWK-Betrieb) (Tabelle 6) sowie den Emissionsfaktoren der Stromerzeugung aus konventionellen Energieträgern (Tabelle 7) berechnen.

Tabelle 22: Substitutionsfaktoren der Stromerzeugung aus Wasserkraft

	Kernenergie [%]	Braunkohle [%]	Steinkohle [%]	Gas [%]	Öl [%]
Wasserkraft	0,0	0,0	64	36	0,0

Quelle: (ISI, 2016)

4.4.3 Emissionsfaktoren

Die Vorketten-Emissionen für Wasserkraft basieren auf der Ökobilanzdatenbank GEMIS 4.94. Grundlage sind die im Rahmen des BMU-Vorhabens LCA-EE von (ESU, 2012) aktualisierten Sachbilanzen (Öko-Institut, 2012). Bei den Berechnungen werden nur die Emissionen auf der Herstellungsseite (aus den Vorketten) und aus dem Bezug von fremdbezogener Hilfsenergie berücksichtigt, da der direkte Betrieb einer Anlage zur Stromerzeugung aus Wasserkraft emissionsfrei ist. Der Brutto-Nutzungsgrad wird für Bilanzierung mit 100 Prozent angesetzt.

Tabelle 23: Emissionsfaktoren der Stromerzeugung aus Wasserkraft

Wasserkraft davon anteilig:	CO ₂ - Äq.	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	SO ₂ - Äq.	SO ₂	NO _x	Staub	CO	NMVOC
	[g/kWh]				[g/kWh]			[g/kWh]		
Laufwasser										
Vorkette	2,70	2,59	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00
Direkte	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hilfsenergie	9,68	9,16	0,02	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00
Speicherwasser bzw. Pumpspeicherwasser mit natürlichem Zufluss										
Vorkette	14,04	6,54	0,30	0,00	0,03	0,01	0,02	0,03	0,02	0,00
Direkte	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hilfsenergie	12,10	11,44	0,02	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00

Quelle: GEMIS 4.94 (IINAS, 2016), (Öko-Institut, 2012), (ESU, 2012)

4.4.4 Ergebnisse der Emissionsbilanz

Die Netto-Emissionsbilanz der Stromerzeugung aus Wasserkraft errechnet sich aus den oben angegebenen Einzelgrößen. Die resultierenden Bilanzergebnisse sind in Tabelle 24 dargestellt.

Mit vermiedenen Treibhausgasemissionen von ca. 15,6 Mio. t CO₂-Äq. leistet Wasserkraft einen nennenswerten Beitrag zum Klimaschutz. Der spezifische Vermeidungsfaktor liegt mit ca. 745,7 g CO₂-Äq. / kWh_{el} über allen anderen erneuerbaren Stromerzeugungstechnologien.

Aufgrund des emissionsfreien Anlagenbetriebs trägt Wasserkraft darüber hinaus zu einer Reduktion der Luftschadstoffe bei.

Tabelle 24: Emissionsbilanz der Stromerzeugung aus Wasserkraft

	brutto vermiedene Emissionen [t]	verursachte Emissionen [t]	netto vermiedene Emissionen [t]	Netto-Vermeidungs- faktor [g/kWh]
CO₂-Äq.	15.591.548	270.888	15.320.660	745,68
CO ₂	14.161.987	248.766	13.913.221	677,17
CH ₄	54.564	768	53.796	2,62
N ₂ O	220	10	210	0,01
SO₂-Äq.	13.694	399	13.296	0,65
SO ₂	6.259	156	6.103	0,30
NO _x	10.684	349	10.335	0,50
Staub	570	80	491	0,02
CO	3.526	413	3.113	0,15
NMVOG	585	18	567	0,03

Quelle: Eigene Berechnung

4.5 Tiefengeothermie

Geothermie (Erdwärme) ist die unterhalb der festen Oberfläche der Erde gespeicherte Wärmeenergie. Je tiefer man in das Innere der Erde vordringt, desto wärmer wird es. In Mitteleuropa nimmt die Temperatur um etwa 3 °C pro 100 Meter Tiefe zu. Für die geothermische Stromerzeugung geeignete Standorte finden sich in Deutschland vor allem im Norddeutschen Becken, im Oberrheingraben sowie im süddeutschen Molassebecken. Das für die Stromerzeugung nutzbare Temperaturniveau ist in der Regel in Deutschland ab Tiefen von 3.000 m anzutreffen (GZB, 2012).

Trotz großer technischer Potenziale (UBA, 2010) entwickelt sich die geothermische Stromerzeugung in Deutschland aufgrund wirtschaftlicher Restriktionen nur langsam. Am Ende des Jahres 2015 gab es in Deutschland 6 Standorte mit Geothermiekraftwerken zur Stromerzeugung. Insgesamt haben diese Kraftwerke eine installierte elektrische Leistung von 32 MW (Agemar, Weber, & Schulz, 2014).

4.5.1 Energiebereitstellung

Die Angabe zur Bruttostromerzeugung aus Tiefengeothermie wird von der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) übernommen (vgl. Kapitel 2.2.1). Der in Tabelle 25 angegebene Datenstand entspricht der BMWi-Publikation „Erneuerbare Energie in Zahlen - Nationale und internationale Entwicklung (BMWi, 2017), die jährlich im September/Oktober publiziert wird. Zusätzlich erfolgt zum Jahresende sowie zum Februar/März eine Datenaktualisierung.²⁷

Tabelle 25: Stromerzeugung aus Tiefengeothermie

	2016 [GWh]
Tiefengeothermie	162

²⁷ Die aktuellen Daten in der Zeitreihe ab 1990 sind abrufbar unter: http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html

Quelle: (AGEE-Stat, 2017)

Methodische Details zur Stromerzeugung aus Tiefengeothermie können der Dokumentation „Datenquellen und Methodik der AGEE-Stat-Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland“ (UBA, 2016) entnommen werden.

4.5.2 Substitutionsfaktoren

Die Substitutionsfaktoren für die Stromerzeugung aus Tiefengeothermie werden mithilfe einer ex-post-Simulation von Fraunhofer ISI ermittelt (vgl. Kapitel 2.2.6 und (ISI, 2016)). Aktuell liegen gemittelte Substitutionsfaktoren der geothermischen Stromerzeugung für das Jahr 2013 vor (vgl. Tabelle 26). Unter der Annahme weitgehend unveränderter Bedingungen werden diese vorläufig fortgeschrieben.

Entscheidend bei Tiefengeothermie ist das dargebotsunabhängige Einspeiseprofil. Dennoch ersetzt Strom aus Tiefengeothermie hauptsächlich Steinkohlekraftwerke und in etwas geringerem Umfang auch Erdgaskraftwerke. Aufgrund der Stellung in der deutschen und europäischen Merit-Order wird weder Strom aus Braunkohle bzw. Kernenergie verdrängt.

Die vermiedenen Brutto-Emissionen der Stromerzeugung aus Tiefengeothermie lassen sich aufbauend auf den dargestellten Substitutionsfaktoren mittels der Brutto-Nutzungsgrade (Mittelung von Kondensations- und KWK-Betrieb) (Tabelle 6) sowie den Emissionsfaktoren der Stromerzeugung aus konventionellen Energieträgern (Tabelle 7) berechnen.

Tabelle 26: Substitutionsfaktoren der Stromerzeugung aus Tiefengeothermie

	Kernenergie [%]	Braunkohle [%]	Steinkohle [%]	Gas [%]	Öl [%]
Tiefengeothermie	0,0	0,0	65	35	0,0

Quelle: (ISI, 2016)

4.5.3 Emissionsfaktoren

Aktuelle Emissionsfaktoren der geothermischen Stromerzeugung wurden zuletzt durch das (Öko-Institut, 2012) auf Basis einer umfassenden Sachbilanz des Internationalen Geothermiezentrums Bochum (GZB, 2012) berechnet. Bei der Bilanzierung werden nur die Emissionen auf der Herstellungsseite (den sogenannten Vorketten) und Emissionen aus der benötigten fremdbezogenen Hilfsenergie jedoch keine direkten Emissionen aus dem Betrieb der geothermischen Kraftwerke berücksichtigt.

Die gegenwärtigen insgesamt in Deutschland in Betrieb befindlichen geothermischen Kraftwerke befinden sich entweder im Oberrheingraben oder im Süddeutschen Molassebecken. Für die folgenden Betrachtungen wird ein entsprechendes Kraftwerk mit einer Thermalwassertemperatur von 150 °C zugrunde gelegt. Dies korrespondiert mit einer Netto-Leistung von ca. 1,4 MW_{el} im Oberrheingraben bzw. ca. 2,3 MW_{el} im Süddeutschen Molassebecken. Weitere Parameter sind in Tabelle 27 aufgeführt und in (GZB, 2012) dokumentiert.

Folgende Lebenszyklusphasen können unterschieden werden:

- ▶ die Errichtungsphase bestehend aus der Bohrung, dem Bohrungsausbau (u. a. Zementation und Verrohrung) und dem Bau der obertägigen Anlagen (u. a. Kraftwerk und Kühlturm),
- ▶ der Betrieb der geothermischen Anlage (u. a. Eigenverbrauch, Arbeitsmittelverluste) und
- ▶ der Rückbau (in der Bilanzierung nicht explizit berücksichtigt).

Während in der Errichtungsphase neben Materialaufwendungen in Form von Beton und Stahl vor allem der Antrieb der Bohranlage zu Buche schlägt, wird die Ökobilanz während des Betriebes dominiert durch den erheblichen Eigenstromverbrauch für den Thermalwasser-, Konversions- und Kühlkreislauf. Der Stromverbrauch im Betrieb ist abhängig von der Förderrate und der Produktivität des Reservoirs, dem Konversionsprozess, der Anlagengröße und einer eventuellen Wärmeauskopplung sowie von der Kühltechnologie. Datenerhebungen bei den Anlagenbetreibern haben ergeben, dass die summierten Eigenverbräuche ca. 22 Prozent bezogen auf die Bruttostromerzeugung ausmachen (Janczik & Kaltschmitt, 2017). Aufgrund der spezifischen Anreize des EEG zur Brutto-Einspeisung wird im vorliegenden Bericht unterstellt, dass der Eigenstromverbrauch aus dem Netz bezogen wird, was die hohen Emissionsfaktoren im Bereich fremdbezogener Hilfsenergie erklärt.

Tabelle 27: Basisannahmen des verwendeten Ökobilanz-Datensatzes für die geothermische Stromerzeugung

Parameter		Oberrhingraben	Süddeutsches Molassebecken
mittlere Außentemperatur	[°C]	10,2	6,8
Vor- und Rücklauf Temperatur Thermalwasser	[°C]	150 / 70	150 / 70
Massenstrom Thermalwasser	[kg / s]	47	76
Tiefe	[m]	3.160	4.300
technische Lebensdauer	[a]	30	30
Volllaststunden el.	[h / a]	7.500	7.500

Quelle: (Öko-Institut, 2012), (GZB, 2012)

Ein weiterer Einflussfaktor auf die Emissionsbilanz ist der schleichende Arbeitsmittelverlust in Form von F-Gasen (Janczik & Kaltschmitt, 2017). Das Treibhausgasinventar geht hierbei bei ORC-Anlagen von einer mittleren jährlichen Leckagerate von ca. 4 Prozent aus (UBA, 2017). Allerdings werden die durch Leckage auftretenden Emissionen des direkten Anlagebetriebes in der Emissionsbilanz erneuerbarer Energien auf Grund ihrer spezifischen Natur nicht separat erfasst.

Tabelle 28: Emissionsfaktoren der geothermischen Stromerzeugung

Tiefengeothermie	CO ₂ -Äq.	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	SO ₂ -Äq.	SO ₂	NO _x	Staub	CO	NM VOC
	[g/kWh]				[g/kWh]				[g/kWh]	
Vorkette	6,33	5,36	0,03	0,00	0,06	0,02	0,06	0,01	0,04	0,00
Direkte	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hilfsenergie	193,59	183,10	0,32	0,01	0,23	0,11	0,17	0,01	0,11	0,01

Quelle: GEMIS 4.94 (IINAS, 2016), (Öko-Institut, 2012), (GZB, 2012)

4.5.4 Ergebnisse der Emissionsbilanz

Die Netto-Emissionsbilanz der geothermischen Stromerzeugung errechnet sich aus den oben angegebenen Einzelgrößen. Die resultierenden Bilanzergebnisse sind in Tabelle 29 dargestellt.

In Hinblick auf die Wirkungskategorie Treibhausgaseneffekt wurden durch die geothermische Stromerzeugung Treibhausgasemissionen in Höhe von ca. 91.647 t CO₂-Äq. vermieden. Der spezifische Vermeidungsfaktor beträgt 564,11 g CO₂-Äq. / kWh_{el} bezogen auf die Brutto-Einspeisung in das öffentliche Stromnetz. Die im Vergleich zu anderen erneuerbaren Stromerzeugungsoptionen geringe spezifische

Vermeidung ist im Wesentlichen auf den hohen Eigenstromverbrauch für den Thermalwasser-, Konversions- und Kühlkreislauf zurückzuführen. Auch zur Vermeidung von anderen, traditionellen Luftschadstoffemissionen leistet die Tiefengeothermie über den Gesamtlebenszyklus einen positiven Beitrag, da sie zumindest nach Abschluss der Bohr- und Bauphase einen annähernd emissionsfreien Betrieb aufweist.

Tabelle 29: Emissionsbilanz der geothermischen Stromerzeugung

	brutto vermiedene Emissionen [t]	verursachte Emissionen [t]	netto vermiedene Emissionen [t]	Netto-Vermeidungs- faktor [g/kWh]
CO₂-Äq.	124.127	32.480	91.647	564,11
CO ₂	112.736	30.618	82.118	505,46
CH ₄	435	57	378	2,33
N ₂ O	2	1	0	0,00
SO₂-Äq.	109	46	63	0,39
SO ₂	50	20	30	0,19
NO _x	85	38	47	0,29
Staub	5	3	2	0,01
CO	28	24	4	0,02
NMVOG	5	2	3	0,02

Quelle: Eigene Berechnung

4.6 Feste Biomasse

Die Stromerzeugung aus fester Biomasse hat seit Inkrafttreten des Erneuerbaren-Energien-Gesetzes 2000 stetig zugenommen. Gleichwohl ist in den letzten Jahren ein deutlicher Rückgang der jährlichen Zuwachsrates zu verzeichnen, unter anderem, da die wirtschaftlich mobilisierbaren und nachhaltig verfügbaren Holzressourcen begrenzt sind und zudem die Förderung mit der Einführung des EEG 2014 zurückgefahren wurde.

Die Stromerzeugung aus fester Biomasse kann nach verschiedenen Parametern klassifiziert werden, z. B.:

- ▶ Anlagengröße (von 1 kW bis 100 MW),
- ▶ Technik zur Energieumwandlung (Dampfturbine, Entnahmekondensationsturbine, ORC, Holzgas-BHKW, Dampfmotor, Stirlingmotor, u. a.),
- ▶ Art und Herkunft des eingesetzten Brennstoffs (Altholz Klasse I bis IV, Sägereistholz, Waldrestholz, Landschaftspflegeholz, Pellets, u. a.),
- ▶ Immissionschutzrechtliche Genehmigung (TA-Luft, 13. BImSchV, 17. BImSchV).

4.6.1 Energiebereitstellung

Die Angabe zur Bruttostromerzeugung aus fester Biomasse wird von der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) übernommen (vgl. Kapitel 2.2.1). Der in Tabelle 30 angegebene Datenstand entspricht der BMWi-Publikation „Erneuerbare Energie in Zahlen - Nationale und internationale Entwicklung (BMWi, 2017), die jährlich im September/Oktober publiziert wird. Zusätzlich erfolgt zum

Jahresende sowie zum Februar/März eine Datenaktualisierung.²⁸ Methodische Details zur Stromerzeugung aus fester Biomasse können der Dokumentation „Datenquellen und Methodik der AGEE-Stat-Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland“ (UBA, 2016) entnommen werden.

Tabelle 30: Stromerzeugung aus fester Biomasse

	2016 [GWh]
feste Biomasse	10.950

Quelle: (AGEE-Stat, 2017)

4.6.2 Substitutionsfaktoren

Die Substitutionsfaktoren für die Stromerzeugung aus fester Biomasse werden mithilfe einer ex-post-Simulation von Fraunhofer ISI ermittelt (vgl. Kapitel 2.2.6 und (ISI, 2016)). Aktuell liegen die gemittelten Substitutionsfaktoren der Stromerzeugung im Jahr 2013 vor (vgl. Tabelle 31). Diese werden vorläufig fortgeschrieben

Die auf Dauerbetrieb ausgelegten größeren (Heiz)kraftwerke, auf die das Gros der Stromerzeugung aus fester Biomasse entfällt, weisen im Mittel eine hohe Volllaststundenzahl von über 6.000 auf. Entsprechend kann von einer im Jahresverlauf nahezu konstanten Einspeisecharakteristik ausgegangen werden, woraus sich die in Tabelle 31 dargestellten Substitutionsfaktoren ergeben.

Die vermiedenen Brutto-Emissionen der Stromerzeugung aus fester Biomasse lassen sich aufbauend auf den dargestellten Substitutionsfaktoren mittels der Brutto-Nutzungsgrade (Mittelung von Kondensations- und KWK-Betrieb) (Tabelle 6) sowie den Emissionsfaktoren der Stromerzeugung aus konventionellen Energieträgern (Tabelle 7) berechnen.

Tabelle 31: Substitutionsfaktoren der Stromerzeugung aus fester Biomasse

	Kernenergie [%]	Braunkohle [%]	Steinkohle [%]	Gas [%]	Öl [%]
feste Biomasse	0,0	0,0	65	35	0,0

Quelle: (ISI, 2016)

4.6.3 Emissionsfaktoren

Trotz der Vielfalt und technischen Einzigartigkeit der realisierten Biomasse(heiz)kraftwerke in Deutschland sind die eingangs genannten Differenzierungsmerkmale in der Regel nicht unabhängig voneinander. Vielmehr bestehen relativ typische Kombinationen von Leistungsgröße, Kraftwerkstechnik und immissionschutzrechtlichen Anforderungen einerseits sowie dem Einsatz verschiedener Brennstoffe andererseits. Dies wird im Folgenden genutzt, um idealtypische Referenzfälle (vgl. Tabelle 32) abzuleiten und diesen einen geschätzten Anteil der Gesamtstromerzeugung aus fester Biomasse zuzuordnen.

Die Grundlagen hierfür wurden auf einem im Sommer 2011 gemeinsam von UBA, BMU, AGEE-Stat und dem Deutschen Biomasseforschungszentrum durchgeführten Workshop erarbeitet (UBA, et al., 2012).

²⁸ Die aktuellen Daten in der Zeitreihe ab 1990 sind abrufbar unter: http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html

Aufbauend hierauf wurden die technischen Kenndaten der Referenzfälle als Expertenschätzung festgelegt. Zur Ermittlung des elektrischen Nutzungsgrads der Referenzfälle für die Stromerzeugung aus fester Biomasse wird der Energieeinsatz bei KWK-Anlagen entsprechend der Finnischen Methode auf Strom und Wärme aufgeteilt.

Die Emissionsfaktoren sind für den direkten Anlagenbetrieb der aktuellen Berichterstattungsrunde des Nationalen Emissionsinventars (UBA, 2017) entnommen. Allerdings liegen die Emissionsfaktoren dort nicht differenziert nach Brennstoffen, sondern nach immissionsrechtlicher Genehmigung der Anlage nach 17. BImSchV, 13. BImSchV, 4. BImSchV (TA-Luft) oder 1. BImSchV vor. Je nach Brennstoffeigenschaften und vorhandenen Luftreinhalteverfahren können die realen Emissionen im Einzelfall daher erheblich von den hier unterstellten, durchschnittlichen Faktoren abweichen.

Tabelle 32: Basisannahmen der Referenzfälle für die Stromerzeugung aus fester Biomasse und geschätzter Anteil der Referenzfälle am Erzeugungsmix

Brennstoff	Technik	Immissionschutz	el. NG (nach Allokation bei KWK gem. Finnischer Methode) [%]	Eigenstrombedarf ²⁹ [%]	Erzeugungsmix ³⁰ [%]
Altholz	DT-Kondensationsmaschine	17. BImSchV	26	2,5	29
Altholz	DT-Entnahmekondensationsmaschine	TA-Luft	36	2,5	19
Industrierestholz	DT-Entnahmekondensationsmaschine	TA-Luft	37	10	9
Industrierestholz	DT-Entnahmekondensationsmaschine	13. BImSchV	37	2,5	3
Industrierestholz	Organic Rankine Cycle	TA-Luft	37	20	2
Klärschlamm	DT-Entnahmekondensationsmaschine	13. BImSchV	27	2,5	2
Pellets (Holz)	VM- Entnahmekondensationsmaschine	TA-Luft	36	5,0	<1
Schwarzlauge	DT-Entnahmekondensationsmaschine	13. BImSchV	46	2,5	17
Waldrestholz	DT-Entnahmekondensationsmaschine	TA-Luft	31	10	12
Waldrestholz	DT-Entnahmekondensationsmaschine	13. BImSchV	31	2,5	4
Waldrestholz	Organic Rankine Cycle	TA-Luft	31	20	3

Quelle: (UBA, et al., 2012), (IFEU, 2016), (Destatis, 2016)

Die Vorketten-Emissionen der Referenzfälle für die Stromerzeugung aus fester Biomasse basieren auf der IFEU-Studie zur „Aktualisierung der Eingangsdaten und Emissionsbilanzen wesentlicher biogener Energienutzungspfade (BioEm)“ (IFEU, 2016). In Hinblick auf die Brennstoffe ist per Definition festgelegt, dass die Vorkettenemissionen von Schwarzlauge und von biogenen Abfällen null entsprechen. Bei

²⁹ eigene Annahmen auf Basis von BioEm (IFEU, 2016)

³⁰ eigene Berechnung auf Basis von (Destatis, 2016b)

Altholz werden lediglich die Aufwendungen für Aufbereitung und Transport berücksichtigt. Des Weiteren wird trotz der Diskussion um „carbon debts“ bei der energetischen Nutzung von Waldholz (Agostini, Giuntoli, & Boulamanti, 2013) angenommen, dass die Entnahme von Waldholz aufgrund der nachhaltigen Waldwirtschaft in Deutschland treibhausgasneutral erfolgt, so dass lediglich die energetischen Aufwendungen für die Ernte und den Transport des Holzes zu Buche schlagen.

Tabelle 33: Emissionsfaktoren der Stromerzeugung aus fester Biomasse geordnet nach eingesetztem Brennstoff

Fester Biomasse Brennstoff ³¹	CO ₂ -Äq.	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	SO ₂ -Äq.	SO ₂	NO _x	Staub	CO	NMVOC
	[g/kWh]				[g/kWh]			[g/kWh]		
Altholz										
Vorkette	11,49	10,94	0,02	0,00	0,07	0,01	0,09	0,00	0,02	0,01
Direkte	4,21	0,00	0,04	0,01	0,29	0,05	0,34	0,00	0,07	0,00
Hilfsenergie DT-KM	3,94	3,73	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hilfsenergie DT-EKM	5,50	5,20	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Industrierestholz										
Vorkette	10,45	10,01	0,01	0,00	0,06	0,01	0,08	0,00	0,01	0,00
Direkte	4,21	0,00	0,04	0,01	0,17	0,03	0,20	0,03	0,14	0,13
Hilfsenergie TA-Luft	22,12	20,92	0,04	0,00	0,03	0,01	0,02	0,00	0,01	0,00
Hilfsenergie 13. BImSchV	5,53	5,23	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hilfsenergie ORC	44,24	41,85	0,07	0,00	0,05	0,02	0,04	0,00	0,02	0,00
Klärschlamm										
Vorkette	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Direkte	4,68	0,00	0,00	0,02	0,87	0,69	0,25	0,07	0,15	0,01
Hilfsenergie	4,13	3,91	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Pellets (Holz)										
Vorkette	10,21	9,58	0,01	0,00	0,10	0,03	0,11	0,01	0,06	0,01
Direkte	29,76	0,00	1,12	0,01	1,05	0,28	1,10	0,02	1,10	0,06

³¹ DT-EKM- Dampfturbine Entnahmekondensationsmaschine, DT-KM- Dampfturbine Kondensationsmaschine,, ORC- Organic Rankine Cycle

Fester Biomasse Brennstoff ³¹	CO ₂ -Äq.	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	SO ₂ -Äq.	SO ₂	NO _x	Staub	CO	NM VOC
	[g/kWh]				[g/kWh]			[g/kWh]		
Hilfsenergie	11,01	10,41	0,02	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00
Schwarzlauge										
Vorkette	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Direkte	1,19	0,00	0,01	0,00	0,29	0,05	0,34	0,00	0,07	0,00
Hilfsenergie	6,97	6,59	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
Waldrestholz										
Vorkette	15,68	14,90	0,03	0,00	0,09	0,01	0,12	0,00	0,03	0,01
Direkte	4,21	0,00	0,04	0,01	0,17	0,03	0,20	0,03	0,14	0,13
Hilfsenergie TA-Luft	18,96	17,93	0,03	0,00	0,02	0,01	0,02	0,00	0,01	0,00
Hilfsenergie 13. BImSchV	4,74	4,48	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hilfsenergie ORC	37,91	35,86	0,06	0,00	0,04	0,02	0,03	0,00	0,02	0,00

Quelle: ZSE (UBA, 2017), BioEM (IFEU, 2016)

4.6.4 Ergebnisse der Emissionsbilanz

Die Netto-Emissionsbilanz der Stromerzeugung aus fester Biomasse errechnet sich aus den oben angegebenen Einzelgrößen. Die resultierenden Bilanzergebnisse sind in Tabelle 34 dargestellt.

Durch die Stromerzeugung aus fester Biomasse wurden Treibhausgasemissionen in Höhe von ca. 7,56 Mio. t CO₂-Äq. vermieden. Damit beträgt der spezifische Vermeidungsfaktor 690 g CO₂-Äq. / kWh_{el} bezogen auf die Netzeinspeisung. Die im Vergleich zu anderen erneuerbaren Stromerzeugungsoptionen hohe spezifische Vermeidung ist im Wesentlichen auf den geringen energetischen Aufwand zur Brennstoffbereitstellung, die als emissionsneutral definierte Waldrestholzentnahme sowie geringe Treibhausgasemissionen beim direkten Anlagenbetrieb zurückzuführen.

Bezüglich der Luftschadstoffe ist die Stromerzeugung aus fester Biomasse je nach Biomasse und Technik unterschiedlich zu bewerten. Während der endenergiebezogene Netto-Vermeidungsfaktor von SO₂ in der Regel leicht positiv ist, liegen Staub-, NO_x-, CO- und NMVOC-Emissionen höher als bei der verdrängten fossilen Stromerzeugung. Trotz des relativ hohen Anteils der nach 17. BImSchV genehmigten Anlagen ist dies v. a. auf den geringeren elektrischen Wirkungsgrad im Vergleich zu fossilen Großkraftwerken zurückzuführen.

Tabelle 34: Emissionsbilanz der Stromerzeugung aus fester Biomasse

	brutto vermiedene Emissionen [t]	verursachte Emissionen [t]	netto vermiedene Emissionen [t]	Netto-Vermeidungsfaktor [g/kWh]
CO₂-Äq.	8.366.019	810.355	7.555.665	690,03
CO₂	7.598.290	644.614	6.953.676	635,05
CH₄	29.310	2.344	26.967	2,46

	brutto vermiedene Emissionen [t]	verursachte Emissionen [t]	netto vermiedene Emissionen [t]	Netto-Vermeidungs- faktor [g/kWh]
N₂O	117	360	-242	-0,02
SO₂-Äq.	7.354	11.311	-3.957	-0,36
SO₂	3.385	2.375	1.011	0,09
NO_x	5.703	12.840	-7.137	-0,65
Staub	306	515	-208	-0,02
CO	1.866	3.884	-2.018	-0,18
NMVOC	312	1.626	-1.315	-0,12

Quelle: Eigene Berechnung

4.7 Biogas und Biomethan

Die Stromerzeugung aus Biogas, das durch anaerobe Fermentation von biogenen Abfällen und Energiepflanzen gewonnen wird, verzeichnete insbesondere durch die Einführung der Vergütungsboni für nachwachsende Rohstoffe und für Gülle im EEG 2004 und 2009 ein starkes Wachstum. Auch wenn sich der Zubau anschließend verlangsamt war Ende des Jahres 2016 nach einer Prognose des Fachverbandes Biogas bereits über 9009 Biogasanlagen mit einer installierten elektrischen Leistung von etwa 4166 Megawatt in Betrieb (Fachverband Biogas, 2017)). Die damit einhergehenden regional unterschiedlich ausgeprägten Begleiterscheinungen wie die starke Zunahme des Energiepflanzenanbaus zur Biogasproduktion sind verbunden mit negativen Umweltwirkungen, zunehmende Flächenkonkurrenzen (häufig verbunden mit dem Anstieg von Pachtpreisen) sowie nicht zuletzt mit Risiken für Umwelt und Klima durch Energiepflanzenanbau und durch nicht nach dem Stand der Technik betriebenen Anlagen. Dies führt zu einer zunehmend differenzierten Bewertung und zu einer skeptischeren Einschätzung hinsichtlich der noch verbleibenden Wachstumspotenziale für die Stromerzeugung aus Biogas und Biomethan.

Gleichzeitig wandeln sich die Erwartungen an die begrenzten, speicherbaren Ressourcen Biogas und Biomethan. Die Zukunft wird vor allem in der bedarfsgerechten, flexiblen Stromerzeugung zum Ausgleich der fluktuierenden Erzeugung von Wind und PV gesehen.

4.7.1 Energiebereitstellung

Die Angabe zur Bruttostromerzeugung aus Biogas und Biomethan wird von der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) übernommen (vgl. Kapitel 2.2.1). Der in Tabelle 34 angegebene Datenstand entspricht der BMWi-Publikation „Erneuerbare Energie in Zahlen - Nationale und internationale Entwicklung (BMWi, 2017), die jährlich im September/Oktobre publiziert wird. Zusätzlich erfolgt zum Jahresende sowie zum Februar/März eine Datenaktualisierung.³²

Tabelle 35: Stromerzeugung aus Biogas und Biomethan

	2016 [GWh]
Biogas	29.250
Biomethan	2.500

³² Die aktuellen Daten in der Zeitreihe ab 1990 sind abrufbar unter: http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html

Quelle: (AGEE-Stat, 2017)

Methodische Details zur Stromerzeugung aus Biogas und Biomethan können der Dokumentation „Datenquellen und Methodik der AGEE-Stat-Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland“ (UBA, 2016) entnommen werden.

4.7.2 Substitutionsfaktoren

Die Substitutionsfaktoren für die Stromerzeugung aus Biogas und Biomethan werden mithilfe einer ex-post-Simulation von Fraunhofer ISI ermittelt (vgl. Kapitel 2.2.6 und (ISI, 2016)). Aktuell liegen die gemittelten Substitutionsfaktoren der Stromerzeugung aus Biogas und Biomethan im Jahr 2013 vor (vgl. Tabelle 36). Diese werden vorläufig fortgeschrieben. Da der Großteil des Biogasanlagenbestands derzeit noch auf kontinuierlichen Betrieb mit einer Volllaststundenzahl über 7.000 ausgelegt ist, substituiert die Stromerzeugung aus Biogas und Biomethan überwiegend Steinkohle- und Gaskraftwerke. Aufgrund der Stellung in der deutschen (und europäischen) Merit-Order wird weder Strom aus Braunkohle bzw. Kernenergie verdrängt.

Die vermiedenen Brutto-Emissionen der Stromerzeugung aus Biogas und Biomethan lassen sich aufbauend auf den dargestellten Substitutionsfaktoren mittels der Brutto-Nutzungsgrade (Mittelung von Kondensations- und KWK-Betrieb) (Tabelle 6) sowie den Emissionsfaktoren der Stromerzeugung aus konventionellen Energieträgern (Tabelle 7) berechnen.

Tabelle 36: Substitutionsfaktoren der Stromerzeugung aus Biogas und Biomethan

	Kernenergie [%]	Braunkohle [%]	Steinkohle [%]	Gas [%]	Öl [%]
Biogas & Biomethan	0,0	0,0	65	35	0,0

Quelle: (ISI, 2016)

4.7.3 Emissionsfaktoren

Die Datenlage hinsichtlich der Emissionen im realen Betrieb von Biogas-BHKW ist sehr lückenhaft. Die mit der Stromerzeugung aus Biogas und Biomethan verbundenen Luftemissionen sind von einer Vielzahl von Einflussfaktoren abhängig, welche in den folgenden Abschnitten kurz diskutiert werden. Die wichtigsten sind:

- ▶ Substrat (NawaRo vs. Abfälle und Reststoffe),
- ▶ Leistungsgröße und Bauart der Blockheizkraftwerke (Wirkungsgrade, Einsatzregime, Motorschlupf, Zünd- und Stützfeuerung),
- ▶ Auslegung und Ausstattung der Anlage (gasdichte Abdeckung der Gärrestlager, Luftdichtheit der biogas- und methanführenden Anlagenteile (Fermenter/Gasspeicher und Gärrestlager), Notfackel, Umfang externer Wärmenutzung, Luftreinhalteverfahren wie Katalysatoren oder Nachverbrennung, Eigenstrombedarf und -bezug, Wärmespeicher),
- ▶ Art der Genehmigung (Immissionschutzrecht oder Baurecht).

Wesentlichen Einfluss auf die Bilanzierungsergebnisse übt zunächst das zur Biogaserzeugung eingesetzte Substrat aus. Während biologisch abbaubare Abfälle oder landwirtschaftliche Reststoffe wie zum Beispiel Mist und Gülle per Definition keine den Vorketten zugehörigen Anbauemissionen aufweisen, ist der Anbau, die Pflege und die Ernte von Energiepflanzen wie Mais, Weizen und Gräsern je nach Intensität der Landwirtschaft mit zum Teil erheblichen Umweltbelastungen verbunden. Neben dem Verbrauch von Diesel für landwirtschaftliche Maschinen und dem Energieaufwand für die Herstellung

von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln führen insbesondere Lachgasemissionen infolge stickstoffhaltiger Kunstdünger zu relevanten THG-Emissionen.

Tabelle 37: Basisannahmen der Referenzfälle für die Stromerzeugung aus Biogas und Biomethan sowie geschätzter Anteil der Referenzfälle am Erzeugungsmix

Energieträger	Gärsubstrat	Technik	Immissionschutz	el. NG (nach Allokation bei KWK gem. Finnischer Methode) [%]	Eigenstrombedarf ³³ [%]	Erzeugungsmix ³⁴ [%]
Biogas	Abfall, Reststoff	Verbrennungsmotor BHKW	TA-Luft	48	8,5	7
	Energiepflanzen	Verbrennungsmotor BHKW	TA-Luft	48	8,5	48
	Energiepflanzen	Verbrennungsmotor BHKW	nach Baurecht genehmigt	48	8,5	31
	Gülle	Verbrennungsmotor BHKW	TA-Luft	48	8,5	8
	Gülle	Verbrennungsmotor BHKW	nach Baurecht genehmigt	48	8,5	6
Bioerdgas	Abfall, Reststoff			57	9,5	3
	Energiepflanzen			57	9,5	88
	Gülle			57	9,5	9

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von (DBFZ, 2015) und BioEm (IFEU, 2016)

Auf Basis der letzten DBFZ-Betreiberbefragung im Rahmen des EEG-Biomasse-Monitoring werden folgende Anteile der einzelnen Substrate angesetzt: Nachwachsende Rohstoffe (v. a. Energiemais) machen ca. 79 Prozent des energiebezogenen Substratmixes aus, auf landwirtschaftliche Exkrememente wie Gülle entfallen 14 Prozent, auf Bioabfall ca. 3 Prozent und auf industrielle und landwirtschaftliche Reststoffe ca. 4 Prozent des energiebezogenen Substrateinsatzes (DBFZ, 2015).

Neben der Wahl des Substrats ist die Effizienz der Biogasgewinnung und -nutzung eine relevante Einflussgröße. Wesentliche Einflussfaktoren auf die Gasausbeute sind u. a. Art und Beschaffenheit von Substrat und Anlagentechnik, hydraulische Verweilzeiten, Reaktorbelastung, Reaktortemperatur sowie der Einsatz von Gärhilfsstoffen. Die Effizienz der Biogasverstromung ist von der Leistungsgröße, der Betriebsweise und nicht zuletzt dem Wartungszustand der Blockheizkraftwerke abhängig. Im Allgemeinen gilt, dass der Jahresnutzungsgrad mit der Anlagenleistung positiv und mit der Zahl an Startvorgängen, Stunden in Teillastbetrieb und längeren Wartungsintervallen negativ korreliert. Als Bauarten von Blockheizkraftwerken sind überwiegend Gas-Ottomotoren (ca. 3/4) und Zündstrahlmotoren (1/4) im Einsatz. Letztere setzen Pflanzenöl zur Zünd- und Stützfeuerung ein. Zur Ermittlung des

³³ abgeleitet aus BioEm (vgl. Kapitel 2.2.3)

³⁴ eigene Berechnung auf Basis von (DBFZ, 2015)

elektrischen Nutzungsgrads der Referenzfälle (vgl. Tabelle 37) für die Stromerzeugung aus Biogas und Biomethan wird der Energieeinsatz bei KWK-Anlagen entsprechend der Finnischen Methode auf Strom und Wärme aufgeteilt.

Tabelle 38: Primärenergiebezogene Emissionsfaktoren der Stromerzeugung aus Biogas/Biomethan nach Gärsubstrat

Biogas und Biomethan	CO ₂ -Äq.	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	SO ₂ -Äq.	SO ₂	NO _x	Staub	CO	NMVOC	
	[g/kWh]				[g/kWh]			[g/kWh]			
Biogas	Energiepflanzen										
	Vorkette	72,83	20,45	0,76	0,11	0,10	0,02	0,12	0,01	0,04	0,01
	Direkte (TA-Luft)	51,48	0,00	1,99	0,01	0,70	0,28	0,60	0,02	0,55	0,03
	Direkte (Baurecht)	138,93	0,00	5,49	0,01	1,05	0,28	1,10	0,02	1,10	0,06
	Hilfsenergie	24,86	23,51	0,04	0,00	0,03	0,01	0,02	0,00	0,01	0,00
	Gülle										
	Vorkette	20,52	2,42	0,72	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00
	Direkte (TA-Luft)	51,48	0,00	1,99	0,01	0,70	0,28	0,60	0,02	0,55	0,03
	Direkte (Baurecht)	51,48	0,00	1,99	0,01	0,70	0,28	0,60	0,02	0,55	0,03
	Hilfsenergie	24,86	23,51	0,04	0,00	0,03	0,01	0,02	0,00	0,01	0,00
	Abfall, Reststoff										
	Vorkette	19,55	1,49	0,72	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
	Direkte	51,48	0,00	1,99	0,01	0,70	0,28	0,60	0,02	0,55	0,03
	Hilfsenergie	24,86	23,51	0,04	0,00	0,03	0,01	0,02	0,00	0,01	0,00
	Biomethan	Energiepflanzen									
Vorkette		129,79	67,68	0,95	0,13	0,32	0,12	0,29	0,01	0,07	0,01
Direkte		25,47	0,00	0,98	0,00	0,15	0,00	0,21	0,00	0,13	0,01
Hilfsenergie		32,76	30,98	0,05	0,00	0,04	0,02	0,03	0,00	0,02	0,00
Gülle											
Vorkette		70,70	47,16	0,92	0,00	0,22	0,10	0,18	0,01	0,03	0,00
Direkte		25,47	0,00	0,98	0,00	0,15	0,00	0,21	0,00	0,13	0,01
Hilfsenergie		32,76	30,98	0,05	0,00	0,04	0,02	0,03	0,00	0,02	0,00
Abfall, Reststoff											
Vorkette		3,08	0,16	0,11	0,00	0,02	0,00	0,03	0,00	0,02	0,00
Direkte	25,47	0,00	0,98	0,00	0,15	0,00	0,21	0,00	0,13	0,01	
Hilfsenergie	32,76	30,98	0,05	0,00	0,04	0,02	0,03	0,00	0,02	0,00	

Quelle: ZSE (UBA, 2017), BioEM (IFEU, 2016)

Als weitere potenzielle Quellen für anlagenbezogene diffuse Methan- und sonstigen Luftemissionen sind die Dichtheit des Gärrestlagers und des Gasspeichers, der Motorschlupf des BHKWs, das Vorhandensein von Überdrucksicherungen (Notfackel) und Oxidationskatalysatoren zu nennen (vgl. UBA, et al., 2012). Allgemein sind größere Biogasanlagen, die für ca. drei Viertel der Stromerzeugung aus Biogas stehen, aufgrund der spezifischen Investitionskosten im Verhältnis zum Ertrag, vor allem aber aufgrund der immissionschutzrechtlichen Genehmigungspflicht von Biogasanlagen in der Regel mit Einrichtungen zur Abgasnachbehandlung, mit Gasfackeln und gasdicht abgedecktem Gärrestlager ausgestattet. Aus diesem Grund werden sämtliche Methanemissionen aus Gärrestlagern (Abschätzung nach (TI, 2016)) die beim direkten Betrieb anfallen, nach Baurecht genehmigten Anlagen zugeordnet.

Die Datenlage hinsichtlich repräsentativer direkter Emissionsdaten aus dem realen Betrieb von Biogas-BHKW ist jedoch allgemein als sehr lückenhaft zu bezeichnen. In einem Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltbundesamtes wurden daher Emissionserklärungen genehmigungspflichtiger Biogasanlagen aus dem Jahre 2004 analysiert, um brennstoffspezifische Emissionsfaktoren für den direkten Anlagenbetrieb abzuleiten (Degel & Jörß, 2009). Auch wenn die Daten wegen der geringen Anzahl erfasster Anlagen mit zum Teil hohen Unsicherheiten verbunden sind, fanden sie als beste verfügbare Datenquellen Eingang in das Nationale Emissionsinventar (UBA, 2017). Für den Energieträger Biomethan wird die Annahme zugrunde gelegt, dass das in das Gasnetz eingespeiste Biomethan Erdgasqualität besitzt. Vor der Einspeisung anfallende Methanemissionen werden der Vorkette zugerechnet, sodass der direkte Emissionsfaktor für Biomethan dem direkten Emissionsfaktor für Erdgas entspricht (UBA, 2017).

Die Vorketten-Emissionen der Referenzfälle für die Stromerzeugung aus Biogas und Biomethan basieren auf der IFEU-Studie zur „Aktualisierung der Eingangsdaten und Emissionsbilanzen wesentlicher biogener Energienutzungspfade (BioEm)“ (IFEU, 2016). Sie werden ergänzt mit den Emissionen aus fremdbezogener Hilfsenergie, welche sich aus dem Eigenstrombedarf des jeweiligen Nutzungspfades ableiten (vgl. Tabelle 38).

4.7.4 Ergebnisse der Emissionsbilanz

Die Netto-Emissionsbilanz der Stromerzeugung aus Biogas und Biomethan errechnet sich aus den oben angegebenen Einzelgrößen. Die resultierenden Bilanzergebnisse sind in Tabelle 39 und Tabelle 40 dargestellt.

Die genannte schwierige Datenlage hat zur Folge, dass die Emissionsbilanzierung von Biogas und Biomethan derzeit nur mit erheblichen Unsicherheiten abgebildet werden kann. Um dem Rechnung zu tragen, wurde insbesondere bei Methan ein konservativer Emissionsfaktor aus dem deutschen Emissionsinventar angesetzt. Die Ergebnisse beinhalten jedoch nicht die Emissionen, die sich durch direkte und indirekte Landnutzungsänderungen ergeben (vgl. Kapitel 2.1.3).

Unter diesen Bedingungen resultiert derzeit eine Treibhausgasvermeidung in Höhe von ca. 12 Mio. t CO₂-Äq. und ein spezifischer Vermeidungsfaktor von 422 g CO₂-Äq. / kWh_{el} durch die Stromerzeugung aus Biogas. Im Falle von Biomethan liegen die netto vermiedenen Emissionen bei ca. 1,1 Mio. t CO₂-Äq. und der spezifischer Vermeidungsfaktor bei 450 g CO₂-Äq. / kWh_{el}. Durch das hohe Treibhausgaspotenzial von Methan und Lachgas ist bereits ohne Einbezug von Landnutzungsänderungen eine signifikant geringere spezifische Vermeidungswirkung gegenüber anderen erneuerbaren Energieträgern im Stromsektor festzustellen.

Aufgrund der heterogenen Zusammensetzung des Rohbiogases und der im Allgemeinen geringeren Anforderungen hinsichtlich Emissionen ist zudem die Bilanz der sonstigen Luftschadstoffe gegenüber fossilen Energieträgern negativ. Hinsichtlich der klassischen Säurebildner SO₂ und NO_x ist allerdings

anzumerken, dass vermiedene NH₃-Emissionen aus alternativer Güllelagerung und -ausbringung aufgrund der Systemgrenzen (siehe Kapitel 2.1.3) nicht berücksichtigt wurden.

Tabelle 39: Emissionsbilanz der Stromerzeugung aus Biogas

	brutto vermiedene Emissionen [t]	verursachte Emissionen [t]	netto vermiedene Emissionen [t]	Netto-Vermeidungs- faktor [g/kWh]
CO₂-Äq.	22.347.963	9.978.844	12.369.119	422,88
CO ₂	20.297.145	2.426.888	17.870.257	610,95
CH ₄	78.296	233.337	-155.041	-5,30
N ₂ O	313	5.767	-5.453	-0,19
SO₂-Äq.	19.646	56.812	-37.166	-1,27
SO ₂	9.043	18.694	-9.651	-0,33
NO _x	15.234	54.767	-39.533	-1,35
Staub	819	1.620	-802	-0,03
CO	4.985	48.068	-43.084	-1,47
NMVOC	833	3.137	-2.304	-0,08

Quelle: Eigene Berechnung

Tabelle 40: Emissionsbilanz der Stromerzeugung aus Biomethan

	brutto vermiedene Emissionen [t]	verursachte Emissionen [t]	netto vermiedene Emissionen [t]	Netto-Vermeidungs- faktor [g/kWh]
CO₂-Äq.	1.910.082	784.718	1.125.364	450,15
CO ₂	1.734.799	415.780	1.319.019	527,61
CH ₄	6.692	8.583	-1.891	-0,76
N ₂ O	27	518	-491	-0,20
SO₂-Äq.	1.679	2.146	-467	-0,19
SO ₂	773	581	192	0,08
NO _x	1.302	2.249	-947	-0,38
Staub	70	70	0	0,00
CO	426	927	-501	-0,20
NMVOC	71	119	-48	-0,02

Quelle: Eigene Berechnung

4.8 Flüssige Biomasse (Pflanzenöl)

Erste dezentrale, stationäre Anlagen zur Stromerzeugung aus Pflanzenöl nahmen insbesondere im Süden Deutschlands bereits in den 1980er Jahren ihren Betrieb auf. Neben diesen in der Regel wärmegeführten Blockheizkraftwerken im kleinen und mittleren Leistungsbereich zur Versorgung privater

Haushalte, kleiner Gewerbebetriebe oder kommunaler Gebäude war vor allem in den Jahren 2005 bis 2008 ein kurzer, EEG-getriebener Ausbauboom von jährlich bis zu 800 Neuanlagen zu verzeichnen.

Die von einer Kombination von attraktiven Fördersätzen im EEG und niedrigen Weltmarktpreisen für Pflanzenöl (v. a. Palmöl) getriebenen Neubauten unterschieden sich von den traditionell mit lokal erzeugtem Rapsöl betriebenen BHKW durch deutlich größere Leistungen (ab 300 kW) und eine eher stromgeführte Betriebsweise. Mit dem Anstieg der Palmölpreise ab 2009 kam es jedoch zu zahlreichen Anlagenstillegungen und einem damit verbundenen Einbruch der Strom- und Wärmeerzeugung aus Pflanzenöl.

4.8.1 Energiebereitstellung

Die Angabe zur Bruttostromerzeugung aus flüssiger Biomasse wird von der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) übernommen (vgl. Kapitel 2.2.1). Der in Tabelle 41 angegebene Datenstand entspricht der BMWi-Publikation „Erneuerbare Energie in Zahlen - Nationale und internationale Entwicklung (BMWi, 2017), die jährlich im September/Oktobre publiziert wird. Zusätzlich erfolgt zum Jahresende sowie zum Februar/März eine Datenaktualisierung³⁵. Methodische Details zur Stromerzeugung aus flüssiger Biomasse können der Dokumentation „Datenquellen und Methodik der AGEE-Stat-Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland“ (UBA, 2016) entnommen werden.

Tabelle 41: Stromerzeugung aus flüssiger Biomasse

	2016 [GWh]
flüssige Biomasse	411

Quelle: (AGEE-Stat, 2017)

4.8.2 Substitutionsfaktoren

Die Substitutionsfaktoren für die Stromerzeugung aus flüssiger Biomasse werden mithilfe einer ex-post-Simulation vom Fraunhofer ISI ermittelt (vgl. Kapitel 2.2.6 und (ISI, 2016)). Aktuell liegen die gemittelten Substitutionsfaktoren der Stromerzeugung im Jahr 2013 vor (vgl. Tabelle 42).

Die Stromerzeugung aus Pflanzenöl substituiert bei den derzeitigen Preisrelationen überwiegend Steinkohle- und Gaskraftwerke. Aufgrund der Stellung in der deutschen (und europäischen) Merit-Order wird weder Strom aus Braunkohle bzw. Kernenergie verdrängt.

Die vermiedenen Brutto-Emissionen der Stromerzeugung aus flüssiger Biomasse lassen sich aufbauend auf den dargestellten Substitutionsfaktoren mittels der Brutto-Nutzungsgrade (Mittelung von Kondensations- und KWK-Betrieb) (Tabelle 6) sowie den Emissionsfaktoren der Stromerzeugung aus konventionellen Energieträgern (Tabelle 7) berechnen.

Tabelle 42: Substitutionsfaktoren der Stromerzeugung aus flüssiger Biomasse

	Kernenergie [%]	Braunkohle [%]	Steinkohle [%]	Gas [%]	Öl [%]
flüssige Biomasse	0,0	0,0	65	35	0,0

³⁵ Die aktuellen Daten in der Zeitreihe ab 1990 sind abrufbar unter: http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Naviga-tion/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html

Quelle: (ISI, 2016)

4.8.3 Emissionsfaktoren

Die mit der Stromerzeugung aus Pflanzenöl verbundenen Emissionen sind im Wesentlichen von drei Einflussfaktoren abhängig:

- ▶ dem Substrat (Rapsöl vs. Palmöl),
- ▶ der Technik und Leistungsgröße der Blockheizkraftwerke (Wirkungsgrade, Einsatzregime),
- ▶ der Art der immissionsschutzrechtlichen Genehmigung (ab 1 MW Feuerungswärmeleistung bzw. ca. 350 kW_{el} Genehmigungspflicht nach BImSchG, damit zusammenhängend Art der Abgasnachbehandlung).

Zum Substrateinsatz liegen Informationen (DBFZ, 2015) vor. Während in Anlagen bis 10 kW ausschließlich Rapsöl zum Einsatz kommt, sind Anlagen ab 150 kW, auf die derzeit über 80 Prozent der installierten Leistung entfallen, in der Regel nur mit Palmöl wirtschaftlich zu betreiben. Unter Berücksichtigung der höheren Auslastung größerer Anlagen werden insgesamt ca. 95 Prozent Palmöl und lediglich ca. 5 Prozent Rapsöl eingesetzt.

Die Verstromung von Pflanzenölen erfolgt überwiegend in umgerüsteten Diesel-Serienmotoren. Die im realen Betrieb erzielten Jahresnutzungsgrade steigen mit zunehmender Anlagenleistung mit einer Sättigung bei ca. 41 Prozent im Leistungsbereich ab 400 kW_{el} stark an. In diesem Zusammenhang ist zu betonen, dass der Anlagenbestand zudem von der Leistungsklasse im Bereich 300 bis 400 kW_{el} dominiert wird, welche insbesondere im Gewerbe oder im Gartenbau vorzufinden ist. Diese Leistungsklasse weist einen hohen elektrischen Wirkungsgrad und eine Stromkennzahl um 1,0 auf. Da diese jedoch in der Regel knapp unterhalb der Schwelle für eine immissionsschutzrechtliche Genehmigungspflicht liegt, sind nur in wenigen Fällen Techniken zur Abgasnachbehandlung installiert.

Zur Ermittlung des elektrischen Nutzungsgrads der Referenzfälle für die Stromerzeugung aus flüssiger Biomasse wird der Energieeinsatz bei KWK-Anlagen entsprechend der Finnischen Methode auf Strom und Wärme aufgeteilt (vgl. Tabelle 43).

Tabelle 43: Basisannahmen der Referenzfälle für die Stromerzeugung aus flüssiger Biomasse und geschätzter Anteil der Referenzfälle am Erzeugungsmix

Brennstoff	Technik	Immissionschutz	el. NG (nach Allokation bei KWK gem. Finnischer Methode) [%]	Eigenstrombedarf ³⁶ [%]	Erzeugungsmix ³⁷ [%]
Flüssige biogene Stoffe	DT-Entnahmekondensationsmaschine	13. BImSchV	27	2	0
Rapsöl	Verbrennungsmotor BHKW	TA-Luft	58	2	5
Palmöl	Verbrennungsmotor BHKW	TA-Luft	58	2	95

³⁶ Annahmen auf Basis von BioEm (IFEU, 2016)

³⁷ Annahmen auf Basis von (DBFZ, 2015)

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von (DBFZ, 2015) und BioEm (IFEU, 2016)

Die Datenlage hinsichtlich der Emissionen aus dem realen Betrieb von Pflanzenöl-BHKW ist sehr lückenhaft. In einem Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltbundesamtes wurden die wenigen vorliegenden Emissionserklärungen von Betreibern genehmigungspflichtiger Anlagen aus dem Jahre 2004 analysiert, um brennstoffspezifische Emissionsfaktoren für den direkten Anlagenbetrieb abzuleiten (Degel & Jörß, 2009). Als derzeit beste verfügbare Datenquelle fanden die Ergebnisse auch Eingang in das Nationale Emissionsinventar (UBA, 2016).

Die Vorketten-Emissionen der Referenzfälle für die Stromerzeugung aus flüssiger Biomasse basieren auf der IFEU-Studie zur „Aktualisierung der Eingangsdaten und Emissionsbilanzen wesentlicher biogener Energienutzungspfade (BioEm)“ (IFEU, 2016). Sie werden ergänzt mit den Emissionen aus fremdbezogener Hilfsenergie, welche sich aus dem Eigenstrombedarf des jeweiligen Nutzungspfads ableiten (vgl. Tabelle 44).

Tabelle 44: Emissionsfaktoren der Stromerzeugung aus flüssiger Biomasse

Flüssige Bio- masse	CO ₂ - Äq.	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	SO ₂ - Äq.	SO ₂	NO _x	Staub	CO	NMVOC
	[g/kWh]				[g/kWh]					
Flüssige biogene Stoffe										
Vorkette	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Direkte	3,28	0,00	0,00	0,01	0,44	0,27	0,24	0,01	0,15	0,01
Hilfsenergie	3,29	3,11	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Rapsöl										
Vorkette	147,05	77,76	0,14	0,22	0,26	0,08	0,26	0,02	0,07	0,02
Direkte	0,93	0,00	0,01	0,00	0,20	0,00	0,28	0,02	0,14	0,01
Hilfsenergie	7,01	6,63	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
Palmöl										
Vorkette	108,36	59,40	0,56	0,12	0,63	0,27	0,51	0,07	0,08	0,02
Direkte	0,93	0,00	0,01	0,00	0,20	0,00	0,28	0,02	0,14	0,01
Hilfsenergie	7,01	6,63	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00

Quelle: (UBA, 2017), (Degel & Jörß, 2009), BioEM (IFEU, 2016)

4.8.4 Ergebnisse der Emissionsbilanz

Die Netto-Emissionsbilanz der Stromerzeugung aus Pflanzenöl errechnet sich aus den oben angegebenen Einzelgrößen. Die resultierenden Bilanzergebnisse sind in Tabelle 45 dargestellt.

In Hinblick auf die Wirkungskategorie Treibhausgasemissionen wurden durch die Stromerzeugung aus Pflanzenöl Treibhausgasemissionen in Höhe von ca. 230.000 t CO₂-Äq. vermieden. Der spezifische Vermeidungsfaktor beträgt ca. 559,9 g CO₂-Äq. / kWh_{el}. Die Ergebnisse berücksichtigen nicht die Emissionen, die sich durch Landnutzungsänderungen ergeben, wobei insbesondere indirekte Effekte relevant sind (vgl. Kapitel 2.1.3). In Hinblick auf Luftschadstoffemissionen ist die Emissionsbilanz bei der Verstromung von Pflanzenöl über den Gesamtlebenszyklus negativ.

Tabelle 45: Emissionsbilanz der Stromerzeugung aus flüssiger Biomasse

	brutto vermiedene Emissionen [t]	verursachte Emissionen [t]	netto vermiedene Emissionen [t]	Netto-Vermeidungs- faktor [g/kWh]
CO₂-Äq.	314.018	83.911	230.106	559,87
CO₂	285.201	47.512	237.689	578,32
CH₄	1.100	401	700	1,70
N₂O	4	89	-84	-0,20
SO₂-Äq.	276	579	-303	-0,74
SO₂	127	188	-61	-0,15
NO_x	214	561	-347	-0,84
Staub	12	64	-53	-0,13
CO	70	162	-92	-0,22
NMVOG	12	24	-13	-0,03

Quelle: Eigene Berechnung

4.9 Klärgas

Die Nutzung von Klärgas zur Stromerzeugung hat bereits vor Einführung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes eingesetzt, wächst seitdem jedoch stetig an. Hintergrund ist der starke Anreiz für die i. d. R. kommunalen Betreiber von Kläranlagen, durch eine anaerobe Klärschlammbehandlung den Energiebedarf für die Klärschlammstabilisierung zu reduzieren, den eigenen Strom- und Wärmebedarf zumindest zum Teil aus eigenen Quellen zu decken und zusätzliche Erlöse durch die Stromeinspeisung in das öffentliche Netz zu erzielen.

4.9.1 Energiebereitstellung

Die Angabe zur Bruttostromerzeugung aus Klärgas wird von der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) übernommen (vgl. Kapitel 2.2.1). Der in Tabelle 46 angegebene Datenstand entspricht der BMWi-Publikation „Erneuerbare Energie in Zahlen - Nationale und internationale Entwicklung (BMWi, 2017), die jährlich im September/Oktobre publiziert wird. Zusätzlich erfolgt zum Jahresende sowie zum Februar/März eine Datenaktualisierung.³⁸ Methodische Details zur Stromerzeugung aus Klärgas können der Dokumentation „Datenquellen und Methodik der AGEE-Stat-Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland“ (UBA, 2016) entnommen werden.

Tabelle 46: Stromerzeugung aus Klärgas

	2016 [GWh]
Klärgas	1.431

Quelle: (AGEE-Stat, 2017)

³⁸ Die aktuellen Daten in der Zeitreihe ab 1990 sind abrufbar unter: http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html

4.9.2 Substitutionsfaktoren

Die Substitutionsfaktoren für die Stromerzeugung aus Klärgas werden mithilfe einer ex-post-Simulation von Fraunhofer ISI ermittelt (vgl. Kapitel 2.2.6 und (ISI, 2016)). Aktuell liegen die ermittelten Substitutionsfaktoren der Stromerzeugung im Jahr 2013 vor (vgl. Tabelle 47). Diese werden vorläufig fortgeschrieben.

Da die anaerobe Klärschlammstabilisierung einen kontinuierlichen Betrieb erfordert, weisen Klärgas-BHKW sehr hohe Vollbenutzungsstunden auf (> 7.500 h/a). Die Stromerzeugung aus Klärgas substituiert bei den derzeitigen Preisrelationen überwiegend Steinkohle- und Gaskraftwerke. Aufgrund der Stellung in der deutschen (und europäischen) Merit-Order wird weder Strom aus Braunkohle bzw. Kernenergie verdrängt. Die vermiedenen Brutto-Emissionen der Stromerzeugung aus flüssigem Klärgas lassen sich aufbauend auf den dargestellten Substitutionsfaktoren mittels der Brutto-Nutzungsgrade (Mittelung von Kondensations- und KWK-Betrieb) (Tabelle 6) sowie den Emissionsfaktoren der Stromerzeugung aus konventionellen Energieträgern (Tabelle 7) berechnen.

Tabelle 47: Substitutionsfaktoren der Stromerzeugung aus Klärgas

	Kernenergie [%]	Braunkohle [%]	Steinkohle [%]	Gas [%]	Öl [%]
Klärgas	0,0	0,0	65	35	0,0

Quelle: (ISI, 2016)

4.9.3 Emissionsfaktoren

Die Datenlage hinsichtlich der Emissionen aus dem realen Betrieb von Klärgas-BHKW ist als lückenhaft zu bezeichnen, zumal viele der Anlagen im niedrigen Leistungsbereich nicht genehmigungspflichtig nach der 4. BImSchV sind. Betreiber genehmigungspflichtiger Anlagen über 1 MW Feuerungswärmeleistung haben gleichwohl nach 11. BImSchV alle vier Jahre eine Emissionserklärung der zuständigen Behörde zu übermitteln.

In einem Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltbundesamtes wurden die vorliegenden Emissionserklärungen aus dem Jahre 2004 analysiert, um brennstoffspezifische Emissionsfaktoren für den direkten Anlagenbetrieb abzuleiten (Degel & Jörß, 2009). Auch wenn die Daten wegen der geringen Anzahl erfasster Anlagen mit zum Teil hohen Unsicherheiten verbunden sind, fanden sie als beste verfügbare Datenquellen auch Eingang in das Nationale Emissionsinventar (UBA, 2017).

Die Emissionen aus der Vorkette werden per Definition gleich Null gesetzt, da es sich bei der anaeroben Klärschlammbehandlung um einen Abfallprozess handelt. Emissionen aus dem Fremdbezug von Hilfsenergie werden aus dem durchschnittlichen Eigenstrombedarf von Klärgas-BHKWs abgeleitet.

Tabelle 48: Emissionsfaktoren der Stromerzeugung aus Klärgas

Klärgas VM BHKW - TA-Luft	CO ₂ - Äq.	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	SO ₂ - Äq.	SO ₂	NO _x	Staub	CO	NMVOC
Vorkette	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Direkte	29,76	0,00	1,12	0,01	0,42	0,11	0,44	0,02	0,65	0,06
Hilfsenergie	25,48	24,10	0,04	0,00	0,03	0,01	0,02	0,00	0,01	0,00

Quelle: (UBA, 2017), (Degel & Jörß, 2009)

Tabelle 49: Mittlerer Brutto-Nutzungsgrad der Stromerzeugung aus Klärgas (Mittelung von Kondensations- und KWK-Betrieb)

	2016 [%]
Klärgas	42,1

Quelle: UBA auf Basis von (Destatis, 2016)

4.9.4 Ergebnisse der Emissionsbilanz

Die Netto-Emissionsbilanz der Stromerzeugung aus Klärgas errechnet sich aus den oben angegebenen Einzelgrößen. Die resultierenden Bilanzergebnisse sind in Tabelle 50 dargestellt.

In Hinblick auf die Wirkungskategorie Treibhausgasemissionen wurden durch die Stromerzeugung aus Klärgas Treibhausgasemissionen in Höhe von ca. 900 Mio. CO₂-Äq. vermieden. Der spezifische Vermeidungsfaktor beträgt ca. 632,88 g CO₂-Äq. / kWh_{el} bezogen auf die Brutto-Einspeisung in das öffentliche Stromnetz bzw. eigenverbrauchten Stroms in der Kläranlage.

Tabelle 50: Emissionsbilanz der Stromerzeugung aus Klärgas

	brutto vermiedene Emissionen [t]	verursachte Emissionen [t]	netto vermiedene Emissionen [t]	Netto-Vermeidungs- faktor [g/kWh]
CO₂-Äq.	1.093.825	187.761	906.064	632,88
CO ₂	993.448	81.919	911.529	636,70
CH ₄	3.832	3.966	-134	-0,09
N ₂ O	15	22	-7	0,00
SO₂-Äq.	962	1.517	-555	-0,39
SO ₂	443	415	28	0,02
NO _x	746	1.583	-838	-0,59
Staub	40	57	-17	-0,01
CO	244	2.251	-2.007	-1,40
NMVOG	41	211	-171	-0,12

Quelle: Eigene Berechnungen

Zur Reduktion versauernd wirkender Substanzen trägt die energetische Klärgasnutzung jedoch wenig bei. Aufgrund der höheren spezifischen Emissionen kleiner Verbrennungsmotoren im Vergleich zu Großkraftwerken ist die Emissionsbilanz hier negativ. Dies gilt auch in Hinblick auf weitere Luftschadstoffe wie Kohlenmonoxid und flüchtige organische Verbindungen wie zum Beispiel Formaldehyd, die zur Bildung von bodennahem Ozon beitragen können (so genannter Sommersmog).

4.10 Deponiegas

Die Oberflächen-Abdichtung von Deponien und die Fassung sowie Verwertung des entstehenden Deponiegases, welches aus der bakteriellen Umsetzung des in Deponien unter anaeroben Bedingungen eingeschlossenen, organischen Siedlungsabfalls stammt, stellt eine relevante Klimaschutzmaßnahme dar. Zusätzliche Emissionsminderungseffekte ergeben sich, wenn das entstehende Deponiegas nicht abgefackelt, sondern zur Strom- bzw. gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung eingesetzt wird. Die grundsätzlich verfügbare KWK-Wärme kann mangels Wärmesenken in räumlicher Nähe häufig jedoch nicht genutzt werden.

4.10.1 Energiebereitstellung

Die Angabe zur Stromerzeugung aus Deponiegas wird von der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) übernommen (vgl. Kapitel 2.2.1). Der in Tabelle 51 angegebene Datenstand entspricht der BMWi-Publikation „Erneuerbare Energie in Zahlen - Nationale und internationale Entwicklung (BMWi, 2017), die jährlich im September/Oktober publiziert wird. Zusätzlich erfolgt zum Jahresende sowie zum Februar/März eine Datenaktualisierung³⁹. Methodische Details zur Stromerzeugung aus Deponiegas können der Dokumentation „Datenquellen und Methodik der AGEE-Stat-Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland“ (UBA, 2016) entnommen werden.

Tabelle 51: Stromerzeugung aus Deponiegas

	2016 [GWh]
Deponiegas	360

Quelle: (AGEE-Stat, 2017)

4.10.2 Substitutionsfaktoren

Die Substitutionsfaktoren für die Stromerzeugung aus Deponiegas werden mithilfe einer ex-post-Simulation von Fraunhofer ISI ermittelt (vgl. Kapitel 2.2.6 und (ISI, 2016)). Aktuell liegen die gemittelten Substitutionsfaktoren der Stromerzeugung im Jahr 2013 vor (Tabelle 52). Diese werden vorläufig fortgeschrieben.

Da Deponiegas kontinuierlich behandelt werden muss, werden BHKW im Dauerbetrieb eingesetzt (> 7.500 h/a). Bei den derzeitigen Preisrelationen werden hierbei überwiegend Steinkohle- und Gas-kraftwerke substituiert. Aufgrund der Stellung in der deutschen (und europäischen) Merit-Order wird weder Strom aus Braunkohle bzw. Kernenergie verdrängt.

Die vermiedenen Brutto-Emissionen der Stromerzeugung aus flüssiger Deponiegas lassen sich aufbauend auf den dargestellten Substitutionsfaktoren mittels der Brutto-Nutzungsgrade (Mittelung von Kondensations- und KWK-Betrieb) (Tabelle 6) sowie den Emissionsfaktoren der Stromerzeugung aus konventionellen Energieträgern (Tabelle 7) berechnen.

Tabelle 52: Substitutionsfaktoren der Stromerzeugung aus Deponiegas

	Kernenergie [%]	Braunkohle [%]	Steinkohle [%]	Gas [%]	Öl [%]
Deponiegas	0,0	65	35	0,0	0,0

Quelle: (ISI, 2016)

4.10.3 Emissionsfaktoren

Die Datenlage hinsichtlich der Emissionen aus dem realen Betrieb von Deponiegas-BHKW ist besser als zum Beispiel bei Klärgas, da viele Anlagen aufgrund ihrer Leistungsgröße genehmigungspflichtig nach der 4. BImSchV sind. Die Betreiber genehmigungspflichtiger Anlagen über 1 MW Feuerungswärmeleistung haben nach 11. BImSchV alle vier Jahre eine Emissionserklärung der zuständigen Behörde zu übermitteln.

³⁹ Die aktuellen Daten in der Zeitreihe ab 1990 sind abrufbar unter: http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html

In einem Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltbundesamtes wurden die vorliegenden Emissionserklärungen aus dem Jahre 2004 analysiert, um brennstoffspezifische Emissionsfaktoren für den direkten Anlagenbetrieb abzuleiten (Degel & Jörß, 2009). Auch wenn die Daten mit gewissen Unsicherheiten verbunden sind, werden sie als derzeit beste verfügbare Datenquellen im Rahmen des Nationalen Emissionsinventars verwendet (UBA, 2017).

Tabelle 53: Emissionsfaktoren der Stromerzeugung aus Deponiegas

Deponiegas VM BHKW - TA-Luft	CO ₂ - Äq.	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	SO ₂ - Äq.	SO ₂	NO _x	Staub	CO	NMVOC
	[g/kWh]				[g/kWh]					
Vorkette	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Direkte	29,76	0,00	1,12	0,01	0,42	0,14	0,40	0,00	0,64	0,03
Hilfsenergie	21,11	19,97	0,04	0,00	0,02	0,01	0,02	0,00	0,01	0,00

Quelle: (UBA, 2017), (Degel & Jörß, 2009)

Die Emissionen aus der Vorkette werden per Definition gleich Null gesetzt, da es sich bei der Deponiegasgewinnung um einen Abfallprozess handelt. Emissionen aus dem Fremdbezug von Hilfsenergie werden aus dem durchschnittlichen Eigenstrombedarf von Deponiegas-BHKWs abgeleitet.

Tabelle 54: Mittlerer Brutto-Nutzungsgrad der Stromerzeugung aus Deponiegas (Mittelung von Kondensations- und KWK-Betrieb)

	2016 [%]
Deponiegas	38,8

Quelle: UBA auf Basis von (Destatis, 2016)

4.10.4 Ergebnisse der Emissionsbilanz

Die Netto-Emissionsbilanz der Stromerzeugung aus Deponiegas errechnet sich aus den oben angegebenen Einzelgrößen. Die resultierenden Bilanzergebnisse sind in Tabelle 55 dargestellt.

In Hinblick auf die Wirkungskategorie Treibhausgasemissionen wurden durch die Stromerzeugung aus Deponiegas Treibhausgasemissionen in Höhe von ca. 228.000 t CO₂-Äq. vermieden. Der spezifische Vermeidungsfaktor beträgt ca. 632,8 g CO₂-Äq. / kWh_{el} bezogen auf die Brutto-Stromerzeugung bzw. Einspeisung in das öffentliche Stromnetz.

In Hinblick auf versauernd wirkende Luftschadstoffemissionen leistet die Deponiegasnutzung nur einen geringen Minderungsbeitrag. In Hinblick auf weitere Luftschadstoffe wie Kohlenmonoxid und flüchtige organische Verbindungen wie zum Beispiel Formaldehyd, die zur Bildung von bodennahem Ozon beitragen können (so genannter Sommersmog), ist die Emissionsbilanz negativ. Die spezifischen Staubemissionen sind hingegen etwas geringer als zum Beispiel bei der Stromerzeugung in Kohlekraftwerken.

Tabelle 55: Emissionsbilanz der Stromerzeugung aus Deponiegas

	brutto vermiedene Emissionen [t]	verursachte Emissionen [t]	netto vermiedene Emissionen [t]	Netto-Vermeidungs- faktor [g/kWh]
CO₂-Äq.	275.052	47.228	227.824	632,84
CO₂	249.811	18.539	231.272	642,42
CH₄	964	1.076	-113	-0,31
N₂O	4	6	-2	-0,01
SO₂-Äq.	242	415	-173	-0,48
SO₂	111	144	-33	-0,09
NO_x	187	389	-201	-0,56
Staub	10	4	6	0,02
CO	61	609	-548	-1,52
NMVOG	10	33	-23	-0,06

Quelle: Eigene Berechnungen

4.11 Biogener Anteil des Siedlungsabfalls

Durch das Verbot der Deponierung unbehandelter Siedlungsabfälle seit 2005 hat die energetische Verwertung des Siedlungsabfalls stark zugenommen. Die Stromerzeugung aus dem biologisch abbaubaren bzw. biogenen Anteil des Siedlungsabfalls wird im Einklang mit der EU-Verordnung über die Energie-statistik VO 1099/2008 und der Richtlinie zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (2009/28/EG) als erneuerbare Energie ausgewiesen. Auf der Grundlage eines Fachgutachtens der TU Dresden im Auftrag des Umweltbundesamtes wird der biogene Anteil des Siedlungsabfalls auf Bundesebene mit 50 Prozent (energetisch) angesetzt (Hofmann, 2010).

4.11.1 Energiebereitstellung

Die Angabe zur Bruttostromerzeugung aus dem biogenen Anteil des Siedlungsabfalls wird von der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) übernommen (vgl. Kapitel 2.2.1). Der in Tabelle 56 angegebene Datenstand entspricht der BMWi-Publikation „Erneuerbare Energie in Zahlen - Nationale und internationale Entwicklung (BMWi, 2017), die jährlich im September/Oktobre publiziert wird. Zusätzlich erfolgt zum Jahresende sowie zum Februar/März eine Datenaktualisierung.⁴⁰ Methodische Details zur Stromerzeugung aus dem biogenen Anteil des Siedlungsabfalls können der Dokumentation „Datenquellen und Methodik der AGEE-Stat-Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland“ (UBA, 2016) entnommen werden.

Tabelle 56: Stromerzeugung aus dem biogenen Anteil des Siedlungsabfalls

	2016 [GWh]
biogener Anteil des Siedlungsabfalls	5.912

Quelle: (AGEE-Stat, 2017)

⁴⁰ Die aktuellen Daten in der Zeitreihe ab 1990 sind abrufbar unter: http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html

4.11.2 Substitutionsfaktoren

Die Substitutionsfaktoren für die Stromerzeugung aus dem biogenen Anteil des Siedlungsabfalls werden mithilfe einer ex-post-Simulation von Fraunhofer ISI ermittelt (vgl. Kapitel 2.2.6 und (ISI, 2016)). Aktuell liegen die gemittelten Substitutionsfaktoren der Stromerzeugung im Jahr 2013 vor (Tabelle 57). Diese werden vorläufig fortgeschrieben

Da die Anlagen zur energetischen Verwertung von Siedlungsabfällen in der Regel auf Dauerbetrieb ausgelegt sind, entsteht ein sehr gleichmäßiges Erzeugungsprofil. Bei den derzeitigen Preisrelationen werden hierbei überwiegend Steinkohle- und Gaskraftwerke substituiert. Aufgrund der Stellung in der deutschen (und europäischen) Merit-Order wird weder Strom aus Braunkohle bzw. Kernenergie verdrängt.

Die vermiedenen Brutto-Emissionen der Stromerzeugung aus dem biogenen Anteil des Siedlungsabfalls lassen sich aufbauend auf den dargestellten Substitutionsfaktoren mittels der Brutto-Nutzungsgrade (Mittelung von Kondensations- und KWK-Betrieb) (Tabelle 6) sowie den Emissionsfaktoren der Stromerzeugung aus konventionellen Energieträgern (Tabelle 7) berechnen.

Tabelle 57: Substitutionsfaktoren der Stromerzeugung aus dem biogenen Anteil des Siedlungsabfalls

	Kernenergie [%]	Braunkohle [%]	Steinkohle [%]	Gas [%]	Öl [%]
biogener Anteil des Siedlungsabfalls	0,0	0,0	65,0	35,0	0,0

Quelle: (ISI, 2016)

4.11.3 Emissionsfaktoren

Die Emissionsfaktoren für die Stromerzeugung aus Siedlungsabfällen sind nachfolgend dokumentiert. Sie werden dem Nationalen Emissionsinventar des Umweltbundesamtes entnommen und liegen dort je Einheit Primärenergie vor.

Emissionen aus der Vorkette und der benötigten fremdbezogenen Hilfsenergie werden per Definition gleich Null gesetzt, da die Aufwendungen zur Sammlung der Siedlungsabfälle ohnehin angefallen wären, d. h. auch bei einer bis zum Jahr 2005 zulässigen Deponierung. Verbleibende Emissionen aus der Zufuhr der Siedlungsabfälle im Heiz(kraft)werk sowie die Emissionen aus der Herstellung des Heiz(kraft)werks sind über den gesamten Lebenszyklus so gering, dass von einer Bilanzierung abgesehen wird.

Tabelle 58: Emissionsfaktoren der Stromerzeugung aus dem biogenen Anteil des Siedlungsabfalls

biogener Siedlungsabfall DT-EKM	CO ₂ -Äq.	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	SO ₂ -Äq.	SO ₂	NO _x	Staub	CO	NMVOC
	[g/kWh]				[g/kWh]			[g/kWh]		
Vorkette	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Direkte	1,45	0,00	0,01	0,00	0,13	0,01	0,18	0,00	0,02	0,00
Hilfsenergie	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Quelle: (UBA, 2017)

Tabelle 59: Mittlerer Brutto-Nutzungsgrad der Stromerzeugung aus dem biogenen Anteil des Abfalls (Mittelung von Kondensations- und KWK-Betrieb)

	2016 [%]
biogener Anteil des Siedlungsabfalls	30,5

Quelle: UBA auf Basis von Destatis (Destatis, 2016)

4.11.4 Ergebnisse der Emissionsbilanz

Die Netto-Emissionsbilanz der Stromerzeugung aus dem biogenen Anteil des Abfalls errechnet sich aus den oben angegebenen Einzelgrößen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 60 dargestellt.

Tabelle 60: Emissionsbilanz der Stromerzeugung aus dem biogenen Anteil des Abfalls

	brutto vermiedene Emissionen [t]	verursachte Emissionen [t]	netto vermiedene Emissionen [t]	Netto-Vermeidungs- faktor [g/kWh]
CO₂-Äq.	4.516.963	28.107	4.488.856	759,28
CO ₂	4.102.452	0	4.102.452	693,92
CH ₄	15.825	126	15.700	2,66
N ₂ O	63	84	-20	0,00
SO₂-Äq.	3.971	2.604	1.366	0,23
SO ₂	1.828	223	1.604	0,27
NO _x	3.079	3.421	-342	-0,06
Staub	165	16	150	0,03
CO	1.007	335	672	0,11
NM VOC	168	17	152	0,03

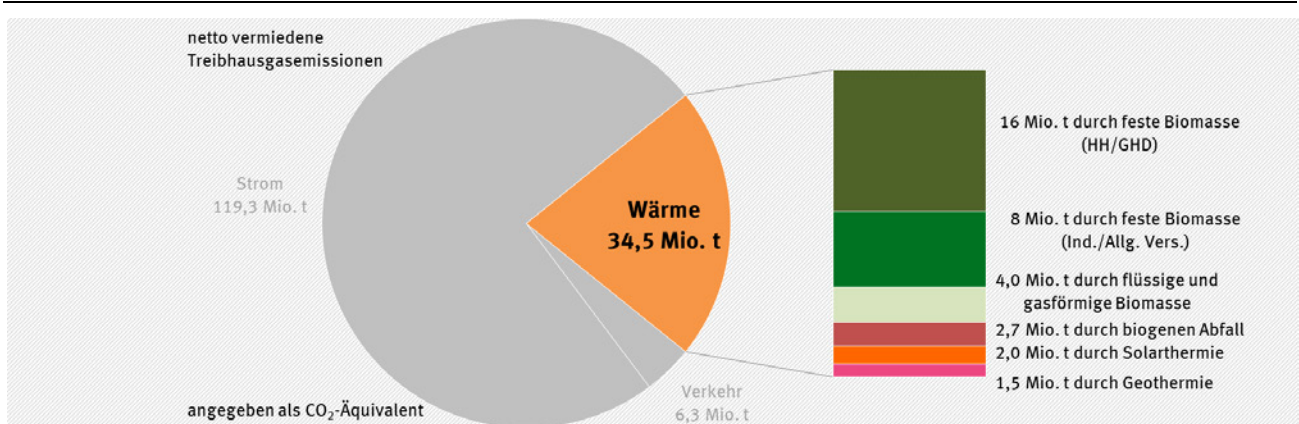
Quelle: Eigene Berechnung

In Hinblick auf die Wirkungskategorie Treibhausgaseffekt wurden durch die Stromerzeugung aus dem biogenen Anteil des Abfalls Treibhausgasemissionen in Höhe von ca. 4,5 Mio. t CO₂-Äq. vermieden. Der spezifische Vermeidungsfaktor beträgt 759,3 g CO₂-Äq. / kWh_{el} bezogen auf die Brutto-Stromerzeugung. Bei den Luftschadstoffemissionen führt die Stromerzeugung aus dem biogenen Anteil des Siedlungsabfalls zu etwas geringeren Emissionen als die verdrängte fossile Stromerzeugung.

5 Erneuerbare Energien im Wärmesektor

Durch den Einsatz von erneuerbaren Energien im Wärmesektor wurden im Jahr 2016 Treibhausgasemissionen in Höhe von 34,5 Mio. t CO₂-Äq. vermieden. Von den drei untersuchten Sektoren (Strom, Wärme und Verkehr) trug der Verbrauch von Wärme aus erneuerbaren Energien etwa 22 Prozent zur Netto-Gesamtemissionsvermeidung an Treibhausgasemissionen bei. Die mit Abstand höchsten absoluten Emissionsvermeidungen wurden durch die verschiedenen Arten der Biomassennutzung erreicht, insbesondere durch den Einsatz von fester Biomasse zur Wärmeerzeugung in Haushalten, GHD, Industrie und allgemeiner Versorgung (insgesamt 24 Mio. t CO₂-Äq.) sowie durch den Einsatz von flüssiger und gasförmiger Biomasse (4 Mio. t CO₂-Äq.). Die Emissionseinsparung durch biogenen Abfall (2,7 Mio. t CO₂-Äq.), Solarthermie (2 Mio. t CO₂-Äq.) und Geothermie (1,5 Mio. t CO₂-Äq.) sind aufgrund der geringeren Nutzung im Vergleich niedriger (siehe Abbildung 14).

Abbildung 14: Anteil des EE-Wärmeverbrauchs an den netto vermiedenen THG-Gesamtemissionen durch die Nutzung erneuerbarer Energien



Quelle: Eigene Darstellung

In den folgenden Abschnitten wird nacheinander die Emissionsbilanz für die Wärmebereitstellung aus fester, flüssiger und gasförmiger Biomasse sowie aus dem biogenen Anteil des Abfalls, aus Solarthermie und aus Geothermie im Detail erläutert. Diese Unterkapitel sind dabei stets gleich aufgebaut: Nach einer kurzen Einleitung werden die jeweils spezifischen Eingangsparameter der Endenergiebereitstellung sowie der Substitutions- und Emissionsfaktoren erläutert (vgl. auch Kapitel 2.2) bevor die Ergebnisse der Emissionsbilanz des jeweiligen erneuerbaren Energieträgers nach der in Kapitel 2.1 erläuterten Methodik dargestellt werden.

Tabelle 61: Mittlere Brutto-Nutzungsgrade der Wärmebereitstellung aus konventionellen Energieträgern (Mittelung von Kondensations- und KWK-Betrieb)

	Heizöl / Diesel [%]	Erdgas [%]	Steinkohlen [%]	Braunkohle-Briketts [%]	Strom (inkl. NV) [%]	Fernwärme (inkl. NV) [%]
Nutzungsgrade	83,0	88,0	73,0	73,0	98,0	96,0

Quelle: UBA auf Basis von (Destatis, 2016)

Zur besseren Einordnung der Ergebnisse werden vorweg die Emissionsfaktoren (Tabelle 61) aufgeteilt nach direkten Emissionsfaktoren und Emissionsfaktoren aus der Vorkette inkl. fremdbezogener Hilfsenergie sowie die dazugehörigen mittleren Brutto-Nutzungsgrade (Tabelle 62) der verdrängten

konventionellen Wärmeerzeugung dargestellt. Diese wurden auf Basis des Nationalen Emissionsinventars (UBA, 2017) abgeleitet und durch die entsprechenden Vorketten der Brennstoffgewinnung und -bereitstellung aus GEMIS 4.94 (IINAS, 2016) ergänzt.

Tabelle 62: Emissionsfaktoren⁴¹ der Wärmebereitstellung aus fossilen Energieträgern in privaten Haushalten, im GHD-Sektor und der Industrie

	CO ₂ - Äq.	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	SO ₂ - Äq.	SO ₂	NO _x	Staub	CO	NM VOC
	[g/kWh]				[g/kWh]			[g/kWh]		
Heizöl / Diesel										
VK inkl. Hilfsenergie	50,87	47,97	0,10	0,00	0,20	0,12	0,11	0,02	0,09	0,04
Direkte	267,06	266,47	0,00	0,00	0,12	0,01	0,15	0,00	0,04	0,01
Erdgas										
VK inkl. Hilfsenergie	44,92	26,79	0,71	0,00	0,08	0,01	0,11	0,01	0,09	0,03
Direkte	201,91	201,37	0,01	0,00	0,05	0,00	0,07	0,00	0,05	0,00
Steinkohlen										
VK inkl. Hilfsenergie	51,95	2,32	1,96	0,00	0,29	0,13	0,22	0,01	0,31	0,00
Direkte	349,06	342,07	0,01	0,02	1,25	0,96	0,42	0,03	0,12	0,02
Braunkohlebriketts										
VK inkl. Hilfsenergie	58,43	54,56	0,03	0,01	0,06	0,03	0,05	0,10	0,05	0,00
Direkte	369,48	358,92	0,20	0,02	0,56	0,35	0,31	0,33	8,49	0,59
Fernwärme (inkl. NV)										
VK inkl. Hilfsenergie	43,64	17,50	1,03	0,00	0,14	0,05	0,13	0,07	0,15	0,04
Direkte	270,86	267,87	0,05	0,01	0,31	0,17	0,20	0,01	0,05	0,01
Strom (inkl. NV)										
VK inkl. Hilfsenergie	60,50	35,99	0,85	0,01	0,10	0,03	0,09	0,01	0,15	0,01
Direkte	544,47	536,21	0,16	0,01	0,62	0,30	0,45	0,02	0,19	0,02

Quelle: (UBA, 2017), GEMIS (IINAS, 2016)

⁴¹ Vkl. inkl. Hilfsenergie – Emissionsfaktor der Vorkette inkl. fremdbezogener Hilfsenergie, Direkte – Emissionsfaktoren aus dem direkten Anlagenbetrieb

5.1 Feste Biomasse (private Haushalte und GHD⁴²)

Biogene Festbrennstoffe, d. h. vor allem holzbasierte Festbrennstoffe, werden in Deutschland seit langem zur Wärmeerzeugung in den Bereichen privater Haushalte und im geringeren Umfang auch im GHD-Sektor eingesetzt. Von den etwa 15 Mio. Holzfeuerstätten in privaten Haushalten wird der überwiegende Anteil lediglich als Zusatz- bzw. Nebenheizungen betrieben. Langjährig unterstützt durch das Marktanzreizprogramm für erneuerbare Energien (MAP) hat jedoch auch die Verbreitung von Zentralheizungen (Heizkesseln) für biogene Festbrennstoffe in den letzten Jahren deutlich zugenommen. Gleiches trifft auf automatisch beschickte Holzhackschnitzel- und Pelletfeuerungen zu.

5.1.1 Endenergiebereitstellung

Die Angabe zur Wärmebereitstellung aus fester Biomasse wird von der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) übernommen (siehe Kapitel 2.2.1). Der in Tabelle 63 angegebene Datenstand entspricht der BMWi-Publikation „Erneuerbare Energie in Zahlen - Nationale und internationale Entwicklung (BMWi, 2017), die jährlich im September/Oktobre publiziert wird. Zusätzlich erfolgt zum Jahresende sowie zum Februar/März eine Datenaktualisierung.⁴³

Die angegebene Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in privaten Haushalten und im GHD-Sektor bezieht sich auf die zur Wärmeerzeugung eingesetzte Endenergie. Dies ist analog zu der Bilanzierung fossiler Brennstoffe wie Heizöl oder Erdgas in der deutschen Energiebilanz. Da keine amtliche Erfassung des Energieverbrauchs privater Haushalte und im GHD-Bereich besteht, muss auf Zusatzerhebungen und Verbandsangaben zurückgegriffen werden:

Der jährliche Verbrauch an Scheitholz und an Holzbriketts durch die privaten Haushalte wird von der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB) auf Grundlage einer Hochrechnung von RWI/Forsa (RWI/forsa, 2015) ermittelt. Der jährliche Gesamteinsatz an Holz im GHD-Sektor basiert auf Ableitungen des Johann Heinrich von Thünen-Instituts (vti).

Die für die Emissionen relevante Unterteilung nach dem Einsatz in Einzelf Feuerungen oder zentralen Scheitholzkesseln erfolgt für beide Verbrauchssektoren auf Basis eines UFOPLAN-Vorhabens des Umweltbundesamtes (Tebert, Volz, & Töfge, 2016).

Der jährliche Gesamtverbrauch an Holzpellets wird vom Deutschen Energieholz- und Pelletverband (DEPV) ausgewiesen. Er errechnet sich aus der inländischen Pelletproduktion und dem Außenhandelsaldo an Holzpellets (DEPI, 2017). Zieht man davon den durch (RWI/forsa, 2011) erhobenen Pelletverbrauch der privaten Haushalte ab, ergibt sich der Einsatz im GHD-Sektor.⁴⁴

Tabelle 63: Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in privaten Haushalten und im GHD-Sektor

	2016 [GWh]
feste Biomasse (private Haushalte und GHD) gesamt	77.708
davon eingesetzt in Einzelf Feuerungen	46.750
davon eingesetzt in zentralen Scheitholzkesseln	21.158
davon eingesetzt in zentralen Pelletkesseln	9.800

Quelle: (AGEE-Stat, 2017), (DEPI, 2017)

⁴² Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (einschl. Militär)

⁴³ Die aktuellen Daten in der Zeitreihe ab 1990 sind abrufbar unter: http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html

⁴⁴ Es ist davon auszugehen, dass der Pelletverbrauch im Industriesektor sehr gering ist.

5.1.2 Substitutionsfaktoren

Die Ermittlung der durch den Holzeinsatz in privaten Haushalten substituierten fossilen Energieträger stellt eine große Herausforderung dar. Ursache hierfür ist die große Zahl und Vielfalt an dezentralen Versorgungsstrukturen und Nutzerverhalten sowie die im Allgemeinen unbefriedigende energiestatistischen Datenlage zum Energieverbrauch privater Haushalte. Zudem liegen weder für fossile noch für erneuerbare Energien verlässliche Informationen zu den Nutzungsgraden der verschiedenen Feuerungsanlagen vor, so dass die Bilanzierung auf der Ebene der Endenergie erfolgt. Insbesondere da der Einsatz von Holz nicht selten noch in alten, ineffizienten Feuerstätten und vorrangig auch in Einzelfeuerungen erfolgt, werden die Substitutionseffekte dadurch überschätzt.

Die in Tabelle 64 ausgewiesenen Substitutionsfaktoren für in Einzelfeuerungen eingesetztes Brennholz fußen auf einer Sonderauswertung der seit mehreren Jahren von RWI/Forsa durchgeführten, repräsentativen Zusatzerhebungen zum Energieverbrauch privater Haushalte (RWI/forsa, 2011) (vgl. Kapitel 2.2.7). Demnach wird zu etwa 50 % Erdgas und zu etwa 41 % Heizöl verdrängt. Diese Werte wurden auch für den GHD-Sektor übernommen.

Für die zentralen Scheitholz- und Pelletkessel wurde in Anlehnung an Befragungsergebnisse des Technologie- und Förderzentrums Straubing im Rahmen der wissenschaftlichen Evaluation des Marktanzreizprogramms erneuerbarer Energien⁴⁵ ein Substitutionsfaktor von 65 % Heizöl abgeleitet (vgl. (Reisinger, Hartmann, & Nothaft, 2009) und (Nast, et al., 2009)). Des Weiteren wird ein relativ geringer Substitutionsfaktor für Erdgas von 20 % angesetzt, der die starke Verbreitung von Scheitholz- und Pelletkesseln in ländlichen Räumen (d. h. ohne Anschlussmöglichkeit an das Gasnetz) widerspiegelt. Aus dem gleichen Grund werden auch die Substitutionsfaktoren für Kohle und Heizstrom etwas höher angesetzt als bei Einzelfeuerungen (zur räumlichen Verteilung von Stromheizungen vgl. u. a. (Frey, Schulz, Horst, & Leprich, 2007)).

Tabelle 64: Substitutionsfaktoren der Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in privaten Haushalten und im GHD-Sektor im Bezug auf die angewendete Technik

Technik	Heizöl/Diesel [%]	Erdgas [%]	Steinkohle [%]	Braunkohle [%]	Strom [%]	Fernwärme [%]
Einzelfeuerungen	41,0	50,0	0,0	1,0	6,0	2,0
Scheitholz- und Pelletkessel	65,0	20,0	2,0	3,0	10,0	0,0

Quelle: Eigene Berechnungen in Anlehnung an (RWI/forsa, 2011), (Reisinger, Hartmann, & Nothaft, 2009), (Frey, Schulz, Horst, & Leprich, 2007)

Die vermiedenen Brutto-Emissionen der Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in privaten Haushalten und im GHD-Sektor lassen sich aufbauend auf den dargestellten Substitutionsfaktoren mittels der Brutto-Nutzungsgrade (Mittelung von Kondensations- und KWK-Betrieb) (Tabelle 61) sowie den Emissionsfaktoren der Wärmeerzeugung aus konventionellen Energieträgern (Tabelle 62) berechnen.

⁴⁵ (Reisinger, Hartmann, & Nothaft, 2009) ermittelten im Rahmen einer wissenschaftlichen Evaluation des Marktanzreizprogramms bei einer Befragung von Fördermittelempfänger in der Kategorie kleine Biomassekessel bis 100 kW folgende Anteile substituiertes fossiler Energieträger (n=449 überwiegend Pellets- und Scheitholz-kessel): 72 % Heizöl, 18 % Erdgas, 9 % Heizstrom, 1 % sonstige Energieträger).

5.1.3 Emissionsfaktoren

Aufgrund der Vielzahl an dezentralen Kleinfeuerungsanlagen liegen weder für den Einsatz fossiler Energieträger noch für den Einsatz von holzbasierten Energieträger repräsentative Messergebnisse für die betrachteten Schadstoffe vor.

Im Folgenden wird daher auf ein im Auftrag des Umweltbundesamts erstelltes Forschungsvorhaben „Effiziente Bereitstellung aktueller Emissionsdaten für die Luftreinhaltung“ (Struschka, Kilgus, Sprigmann, & Baumbach, 2008) und dessen Aktualisierung (Tebert, Volz, & Töfge, 2016) zurückgegriffen. Auch wenn die ermittelten Daten mit Unsicherheiten verbunden sind, werden sie als derzeit beste verfügbare Datenquellen im Rahmen des Nationalen Emissionsinventars verwendet (UBA, 2017).

Unter Berücksichtigung von Geräteart, Leistung, Betriebsweise und Altersstruktur wurden in den Studien gerätespezifische Emissionsfaktoren des Anlagenbetriebes ermittelt. Diese direkten Emissionsfaktoren werden im Folgenden mit den Vorkettenemissionen aus dem UBA-Forschungsvorhaben „Aktualisierung der Eingangsdaten und Emissionsbilanzen wesentlicher biogener Energienutzungspfade (BioEm)“ (IFEU, 2016) und den berechneten Emissionen aus der fremdbezogenen Hilfsenergie ergänzt (vgl. Kapitel 2.2.3).

Die verwendeten durchschnittlichen Nutzungsgrade der Referenzfälle (siehe Tabelle 65) leiten sich aus den ermittelten Jahresnutzungsgraden aus der Schweizer Teilstatistik Holzenergie (BFE, 2016) ab.

Tabelle 65: Durchschnittlicher Nutzungsgrad der Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in privaten Haushalten und im GHD-Sektor

Brennstoff / Technik	2016 [%]
Brennholz Einzelfeuerung	50,0
Brennholz Kessel	70,0
Briketts Einzelfeuerung	50,0
Briketts Kessel	70,0
Holzhackschnitzel Einzelfeuerung	50,0
Holzhackschnitzel Kessel klein (< 50kW)	70,0
Holzhackschnitzel Kessel groß (> 50kW)	80,0
Pellets Einzelfeuerung	80,0
Pellets Kessel	85,0

Quelle: UBA auf Basis der Schweizer Holzstatistik (BFE, 2016)

Tabelle 66: Emissionsfaktoren der Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in privaten Haushalten und im GHD-Sektor

Brennstoff / Technik	CO ₂ -Äq.	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	SO ₂ -Äq.	SO ₂	NO _x	Staub	CO	NM VOC
	[g/kWh]				[g/kWh]			[g/kWh]		
Brennholz Einzelfeuerung										
Vorkette	9,44	8,96	0,01	0,00	0,06	0,00	0,08	0,00	0,02	0,01
Direkte	16,24	0,00	0,56	0,01	0,18	0,03	0,22	0,41	11,60	0,70
Hilfsenergie	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Brennholz Kessel										

Brennstoff / Technik	CO ₂ -Äq.	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	SO ₂ -Äq.	SO ₂	NO _x	Staub	CO	NM VOC
	[g/kWh]				[g/kWh]			[g/kWh]		
Vorkette	9,44	8,96	0,01	0,00	0,06	0,00	0,08	0,00	0,02	0,01
Direkte	1,50	0,00	0,05	0,00	0,28	0,02	0,37	0,16	2,67	0,08
Hilfsenergie	6,35	6,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
Briketts (Holz) Einzelfeuerung										
Vorkette	10,21	9,58	0,01	0,00	0,10	0,03	0,11	0,01	0,06	0,01
Direkte	0,58	0,00	0,01	0,00	0,34	0,02	0,46	0,12	1,30	0,02
Hilfsenergie	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Briketts (Holz) Kessel										
Vorkette	10,21	9,58	0,01	0,00	0,10	0,03	0,11	0,01	0,06	0,01
Direkte	0,44	0,00	0,01	0,00	0,26	0,02	0,35	0,08	0,69	0,01
Hilfsenergie	6,35	6,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
Holzhackschnitzel Einzelfeuerung										
Vorkette	15,68	14,90	0,03	0,00	0,09	0,01	0,12	0,00	0,03	0,01
Direkte	0,43	0,00	0,01	0,00	0,27	0,02	0,36	0,07	0,97	0,01
Hilfsenergie	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Holzhackschnitzel Kessel										
Vorkette	15,68	14,90	0,03	0,00	0,09	0,01	0,12	0,00	0,03	0,01
Direkte (kl. Kessel)	0,43	0,00	0,01	0,00	0,27	0,02	0,36	0,07	0,97	0,01
Direkte (gr. Kessel)	0,44	0,00	0,01	0,00	0,28	0,02	0,37	0,06	1,12	0,01
Hilfsenergie (kl. Kessel)	12,10	11,44	0,02	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00
Hilfsenergie (gr. Kessel)	10,59	10,01	0,02	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00
Pellets Einzelfeuerung										
Vorkette	10,21	9,58	0,01	0,00	0,10	0,03	0,11	0,01	0,06	0,01
Direkte	0,58	0,00	0,01	0,00	0,34	0,02	0,46	0,12	1,30	0,02
Hilfsenergie	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Pellets Kessel										
Vorkette	10,21	9,58	0,01	0,00	0,10	0,03	0,11	0,01	0,06	0,01
Direkte	0,43	0,00	0,01	0,00	0,23	0,02	0,31	0,08	0,56	0,01
Hilfsenergie	12,86	12,16	0,02	0,00	0,02	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00

Quelle: UBA auf Basis von BioEM (IFEU, 2016)

5.1.4 Ergebnisse der Emissionsbilanz

Die brennstoff- bzw. feuerungstypspezifischen Netto-Emissionsbilanzen der Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in privaten Haushalten errechnen sich aus den oben angegebenen Einzelgrößen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 67 bis Tabelle 69 dargestellt.

Insgesamt werden durch die Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in den privaten Haushalten und dem GHD-Sektor Treibhausgasemissionen in Höhe von ca. 16 Mio. t CO₂-Äq. vermieden. Etwa 44 % lassen sich den Einzelfeuerungen, ca. 36 % den Scheitholz-Zentralfeuerungen und etwa 20 % den Pelletfeuerungen zuordnen.

Der spezifische Treibhausgas-Vermeidungsfaktor beträgt bei Einzelfeuerungen aufgrund des hohen Substitutionsanteils von Erdgas nur knapp 150 g CO₂-Äq. / kWh_{th}. Scheitholzkessel ersetzen überwiegend Heizöl und weisen ebenfalls nur geringe Vorkettenemissionen auf, so dass sich insgesamt ein spezifischer Treibhausgas-Vermeidungsfaktor von 273 g CO₂-Äq. / kWh_{th} ergibt. Holzpelletkessel hingegen liegen insbesondere durch die Aufwendungen für Brennstoffherstellung und -transport bei ca. 322 g CO₂-Äq. / kWh_{th}.

Im Hinblick auf versauernd wirkende Luftschadstoffe ist festzuhalten, dass mit dem Einsatz fester Biomasse gegenüber allen substituierten Energieträgern außer Erdgas geringere Schwefeldioxidemissionen verbunden sind. Bei Stickoxiden ist die Emissionsbilanz insbesondere bei Zentralfeuerungsanlagen jedoch leicht negativ.

Hinsichtlich weiterer Luftschadstoffe sind vor allem die hohen Staub- und Kohlenmonoxidemissionen aus dem Betrieb von Einzelfeuerstätten hervorzuheben. Mit der Novelle der 1. BImSchV im Jahr 2010 wurden die diesbezüglichen Emissionsgrenzwerte jedoch bereits deutlich verschärft. Demnach sind die Betreiber nach einer längeren Übergangszeit zu einem Austausch bzw. Nachrüstung der Anlagen, die die neuen Emissionsgrenzwerte nicht einhalten können, verpflichtet.

Tabelle 67: Emissionsbilanz der Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in Einzelfeuerungen (private Haushalte und GHD)

	brutto vermiedene Emissionen [t]	verursachte Emissionen [t]	netto vermiedene Emissionen [t]	Netto-Vermeidungs- faktor [g/kWh]
CO₂-Äq.	8.167.176	1.165.961	7.001.215	149,76
CO ₂	7.804.729	420.503	7.384.227	157,95
CH ₄	13.040	25.600	-12.560	-0,27
N ₂ O	122	354	-232	0,00
SO₂-Äq.	7.075	11.624	-4.549	-0,10
SO ₂	2.501	1.519	983	0,02
NO _x	6.571	14.518	-7.947	-0,17
Staub	575	18.628	-18.053	-0,39
CO	7.144	519.286	-512.142	-10,95
NMVOG	6.571	14.518	-7.947	-0,17

Quelle: Eigene Berechnungen

Tabelle 68: Emissionsbilanz der Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in Scheitholz-Zentralfeuerungen (private Haushalte und GHD)

	brutto vermiedene Emissionen [t]	verursachte Emissionen [t]	netto vermiedene Emissionen [t]	Netto-Vermeidungs- faktor [g/kWh]
CO₂-Äq.	6.026.135	256.772	5.769.363	272,69
CO ₂	5.836.203	218.902	5.617.301	265,50
CH ₄	6.204	1.153	5.052	0,24
N ₂ O	117	30	86	0,00
SO₂-Äq.	6.343	7.236	-893	-0,04
SO ₂	2.793	499	2.293	0,11
NO _x	5.101	9.679	-4.578	-0,22
Staub	611	2.930	-2.319	-0,11
CO	8.144	48.205	-40.061	-1,89
NMVOC	5.101	9.679	-4.578	-0,22

Quelle: Eigene Berechnungen

Tabelle 69: Emissionsbilanz der Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in Pellet-Zentralfeuerungen (private Haushalte und GHD)

	brutto vermiedene Emissionen [t]	verursachte Emissionen [t]	netto vermiedene Emissionen [t]	Netto-Vermeidungs- faktor [g/kWh]
CO₂-Äq.	3.260.623	104.204	3.156.419	322,08
CO ₂	3.155.761	93.845	3.061.916	312,44
CH ₄	3.449	187	3.262	0,33
N ₂ O	63	19	43	0,00
SO₂-Äq.	3.402	3.287	115	0,01
SO ₂	1.485	431	1.054	0,11
NO _x	2.753	4.103	-1.350	-0,14
Staub	326	837	-511	-0,05
CO	4.329	6.044	-1.715	-0,18
NMVOC	2.753	4.103	-1.350	-0,14

Quelle: Eigene Berechnungen

5.2 Feste Biomasse (Industrie)

In der Holzverarbeitenden Industrie, aber auch in der Papier- und Möbelindustrie fällt in großem Umfang Restholz wie Schwarten, Späne, Schwarzlauge, Verpackungsholz, Verschnitt oder Rinde an. Die energetische Nutzung dieser kostengünstig verfügbaren Brennstoffpotenziale zur Bereitstellung von Raum- und Prozesswärme (z. B. für die technische Holz Trocknung) hat in Deutschland eine lange Tradition.

Mit dem Anstieg der Energiepreise für fossile Energien war eine Ausweitung der Wärmebereitstellung aus fester Biomasse verbunden.

5.2.1 Endenergiebereitstellung

Die Angabe zur Wärmebereitstellung aus fester Biomasse wird von der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) übernommen (vgl. Kapitel 2.2.1). Der in Tabelle 70 angegebene Datenstand entspricht der BMWi-Publikation „Erneuerbare Energie in Zahlen - Nationale und internationale Entwicklung (BMWi, 2017), die jährlich im September/Oktobre publiziert wird. Zusätzlich erfolgt zum Jahresende sowie zum Februar/März eine Datenaktualisierung.⁴⁶

Die angegebene Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in der Industrie bezieht sich - analog zur Bilanzierung fossiler Brennstoffe wie Heizöl oder Erdgas in der deutschen Energiebilanz - auf die zur Wärmeerzeugung in Industriebetrieben eingesetzte Endenergie. Die Angaben beruhen auf der von den statistischen Landesämtern durchgeführten Vollerhebung über die Energieverwendung der Betriebe des verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden (Destatis, 2016b).

Hinsichtlich der Feuerungsanlagen ist zu beachten, dass die Mehrzahl der Anlagen zwar Industriekessel zur ungekoppelten Wärmeerzeugung sind, jedoch der überwiegende Teil des Brennstoffeinsatzes auf industriellen Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen entfällt.

Tabelle 70: Wärmebereitstellung (Endenergie) aus fester Biomasse in der Industrie

	2016 [GWh]
feste Biomasse (Industrie)	24.369

Quelle: (AGEE-Stat, 2017)

5.2.2 Substitutionsfaktoren

Wie bereits ausgeführt, konzentrieren sich die energetisch genutzten Stoffströme vor allem auf die Wirtschaftszweige Papier- und Zellstoffindustrie (Schwarzlauge), Holzindustrie (Sägerestholz) und Verarbeitung von Steinen und Erden (biogener Industrieabfall). Ausgehend von diesem Befund wird der fossile Endenergieverbrauchsmix dieser Wirtschaftszweige, ausgewiesen in den Energiebilanzzeilen 48, 53 und 59 (AGEB, 2015), der Ableitung der Substitutionsfaktoren zugrunde gelegt.

Im Ergebnis verdrängt der Einsatz fester Biomasse in diesen Wirtschaftszweigen zu knapp 55 Prozent Erdgas. Mit zusammen knapp 24 Prozent ist jedoch auch die Substitution von Braun- und Steinkohle bemerkenswert. Der Substitutionsfaktor für Elektrizität ist hingegen mit null angesetzt, da der Einsatz von Elektrizität für Trocknungsprozesse o. ä. aus ökonomischen Gründen unplausibel scheint.

Tabelle 71: Substitutionsfaktoren der Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in der Industrie in Bezug auf die angewendete Technik

Technik	Heizöl/Diesel [%]	Erdgas [%]	Steinkohle [%]	Braunkohle [%]	Strom [%]	Fernwärme [%]
feste Biomasse (Industrie)	6,0	55,0	7,0	17,0	0,0	16,0

Quelle: Eigene Berechnungen in Anlehnung an (AGEB, 2015)

⁴⁶ Die aktuellen Daten in der Zeitreihe ab 1990 sind abrufbar unter: http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html

Die vermiedenen Brutto-Emissionen der Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in der Industrie lassen sich aufbauend auf den dargestellten Substitutionsfaktoren mittels der Brutto-Nutzungsgrade (Mittelung von Kondensations- und KWK-Betrieb) (Tabelle 61) sowie den Emissionsfaktoren der Wärmeerzeugung aus konventionellen Energieträgern (Tabelle 62) berechnen.

5.2.3 Emissionsfaktoren

Trotz der Vielfalt und technischen Einzigartigkeit der industriellen Biomasseheiz(kraft)werke in Deutschland können wenige idealtypische Referenzfälle abgeleitet und diesen ein geschätzter Anteil der Wärmebereitstellung aus fester Biomasse zugeordnet werden. Die Grundlagen hierfür wurden auf einem im Sommer 2011 gemeinsam von UBA, BMU, AGEE-Stat und dem Deutschen Biomasseforschungszentrum durchgeführten Workshop erarbeitet (UBA, et al., 2012).

Anschließend wurden die für den Endenergiemix relevanten Referenzfälle mit BioEM modelliert (vgl. Kapitel 2.2.3). Während die Vorketten der Brennstoffbereitstellung hierbei unverändert von BioEM übernommen wurden, sind die Emissionsfaktoren für den direkten Anlagenbetrieb dem Nationalen Emissionsinventar entnommen. Allerdings liegen die Emissionsfaktoren dort nicht differenziert nach Brennstoffen, sondern nach immissionsrechtlicher Genehmigung der Anlage nach 17. BImSchV, 13. BImSchV, 4. BImSchV (TA-Luft) oder 1. BImSchV vor. Je nach Brennstoffeigenschaften und Luftreinhalte-techniken können die realen Emissionen im Einzelfall daher erheblich von den hier unterstellten, durchschnittlichen Faktoren abweichen.

Zur Ermittlung des elektrischen Nutzungsgrads der Referenzfälle für die Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in der Industrie wird der Energieeinsatz bei KWK-Anlagen entsprechend der Finnischen Methode auf Strom und Wärme aufgeteilt.

In Hinblick auf die Brennstoffe ist per Definition festgelegt, dass die Vorkettenemissionen von Industrieresthölzern, Schwarzlauge und biogenen Industrieabfällen null entsprechen. Bei zugekauften Brennstoffen wie Altholz werden lediglich die Aufwendungen für Aufbereitung und Transport berücksichtigt. Importe biogener Festbrennstoffe sind für die Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in der Industrie gegenwärtig noch von untergeordneter Bedeutung.

Tabelle 72: Basisannahmen der Referenzfälle für die Wärmebereitstellung aus fester Biomasse und geschätzter Anteil der Referenzfälle am Endenergiemix

Brennstoff	Technik ⁴⁷	Immissions-schutz	th. NG (nach Allokation bei KWK gem. Finni- scher Methode) [%]	Eigen- strombe- darf ⁴⁸ [%]	Erzeu- gungs- mix ⁴⁹ [%]
Altholz	DT-Entnahmekon- densationsmaschine	17. BImSchV	73	2	17,5
Industrierestholz	DT-Entnahmekon- densationsmaschine	TA-Luft	77	2	5,1
Industrierestholz	DT-Entnahmekon- densationsmaschine	13. BImSchV	77	2	1,7

⁴⁷ DT- Dampfturbine, BHKW-Blockheizkraftwerk

⁴⁸ eigene Annahmen auf Basis von BioEM (IFEU, 2016)

⁴⁹ eigene Annahmen auf Basis von (Destatis, 2016b)

Brennstoff	Technik ⁴⁷	Immissions- schutz	th. NG (nach Allokation bei KWK gem. Finni- scher Methode) [%]	Eigen- strombe- darf ⁴⁸ [%]	Erzeu- gungs- mix ⁴⁹ [%]
Industrierestholz	Organic Rankine Cycle	TA-Luft	83	2	1,7
Industrierestholz	Kessel	-	80	2	27,8
Schwarz-, Brenn-, Sulfitablauge	DT-Entnahmekon- densationsmaschine	13. BlmSchV	96	2	19,8
Pellets (Holz)	Kessel	-	85	3	1,9
Pellets (Holz)	Verbrennungs- motor BHKW	TA-Luft	90	2	0,0
Waldrestholz	Kessel	-	80	2	18,2
Waldrestholz	DT-Entnahmekon- densationsmaschine	TA-Luft	93	2	6,3
Klärschlamm	Kessel	-	80	2	0,0
Klärschlamm	DT-Entnahmekon- densationsmaschine	13. BlmSchV	53	2	0,0

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von (UBA, et al., 2012), (UBA, 2017), BioEm (IFEU, 2016) und (Destatis, 2016b)

Tabelle 73: Emissionsfaktoren der Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in privaten Haushalten und im GHD-Sektor

Brennstoff/ Technik ⁵⁰	CO ₂ - Äq.	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	SO ₂ - Äq.	SO ₂	NO _x	Staub	CO	NMVOC
	[g/kWh]				[g/kWh]					
Altholz										
Vorkette	11,49	10,94	0,02	0,00	0,07	0,01	0,09	0,00	0,02	0,01
Direkte	4,21	0,00	0,04	0,01	0,29	0,05	0,34	0,00	0,07	0,00
Hilfsenergie	10,26	9,70	0,02	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00
Industrierestholz										
Vorkette	10,45	10,01	0,01	0,00	0,06	0,01	0,08	0,00	0,01	0,00
Direkte	4,21	0,00	0,04	0,01	0,38	0,03	0,50	0,07	0,21	0,13
Hilfsenergie DT-EKM	9,35	8,85	0,02	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00

⁵⁰ DT-EKM- Dampfturbine Entnahmekondensationsmaschine, ORC- Organic Rankine Cycle, VM-BHKW - Verbrennungs-
motor Blockheizkraftwerk

Brennstoff/ Technik ⁵⁰	CO ₂ - Äq.	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	SO ₂ - Äq.	SO ₂	NO _x	Staub	CO	NMVOC
	[g/kWh]				[g/kWh]			[g/kWh]		
Hilfsenergie ORC	9,99	9,45	0,02	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00
Hilfsenergie Kessel	9,68	9,16	0,02	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00
Schwarz-, Brenn-, Sulfitablauge										
Vorkette	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Direkte	1,19	0,00	0,01	0,00	0,38	0,03	0,50	0,07	0,21	0,13
Hilfsenergie	11,64	11,01	0,02	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00
Pellets (Holz)										
Vorkette	10,21	9,58	0,01	0,00	0,10	0,03	0,11	0,01	0,06	0,01
Direkte Kessel	0,43	0,00	0,01	0,00	0,23	0,02	0,31	0,08	0,56	0,01
Direkte VM-BHKW	0,34	0,00	0,00	0,00	0,20	0,02	0,26	0,08	0,26	0,00
Hilfsenergie Kessel	12,86	12,16	0,02	0,00	0,02	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00
Hilfsenergie VM-BHKW	10,89	10,30	0,02	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00
Waldrestholz										
Vorkette	15,68	14,90	0,03	0,00	0,09	0,01	0,12	0,00	0,03	0,01
Direkte	4,21	0,00	0,04	0,01	0,38	0,03	0,50	0,07	0,21	0,13
Hilfsenergie DT-EKM	10,04	9,50	0,02	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00
Hilfsenergie Kessel	9,68	9,16	0,02	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00
Klärschlamm										
Vorkette	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Direkte	4,68	0,00	0,00	0,02	0,87	0,69	0,25	0,07	0,15	0,01
Hilfsenergie DT-EKM	6,42	6,07	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
Hilfsenergie Kessel	9,68	9,16	0,02	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00

Quelle: UBA auf Basis von BioEM (IFEU, 2016)

5.2.4 Ergebnisse der Emissionsbilanz

Die Netto-Emissionsbilanz der Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in der Industrie errechnet sich aus den oben angegebenen Einzelgrößen (vgl. Tabelle 74).

Im Hinblick auf die Wirkungskategorie Treibhausgaseffekt trug die Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in der Industrie zur Vermeidung von ca. 7,4 Mio. t CO₂-Äq. Treibhausgasemissionen bei. Der spezifische Treibhausgas-Vermeidungsfaktor beträgt insbesondere aufgrund des hohen Substitutionsanteils von Erdgas nur knapp 290 g CO₂-Äq. / kWh_{th}.

In Hinblick auf versauernd wirkende Luftschadstoffe ist festzuhalten, dass mit dem Einsatz fester Biomasse gegenüber allen substituierten Energieträgern außer Erdgas geringere Schwefeldioxidemissionen verbunden sind. Bei Stickoxiden sind die Emissionen jedoch im Vergleich leicht höher.

Hinsichtlich weiterer Luftschadstoffe zeigt sich, dass vor allem die Staubemissionen trotz der Genehmigungspflicht der Anlagen nach Bundesimmissionsschutzgesetz teilweise deutlich höher liegen als bei dem substituierten fossilen Energieträgermix. Dies gilt jedoch nicht für die Kohlenmonoxidemissionen, welche durch den Einsatz von fester Biomasse in der Industrie sinken.

Tabelle 74: Emissionsbilanz der Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in der Industrie

	brutto vermiedene Emissionen [t]	verursachte Emissionen [t]	netto vermiedene Emissionen [t]	Netto-Vermeidungs- faktor [g/kWh]
CO₂-Äq.	7.401.597	329.547	7.072.050	290,21
CO ₂	6.901.078	228.666	6.672.412	273,81
CH ₄	16.874	1.163	15.711	0,64
N ₂ O	264	241	23	0,00
SO₂-Äq.	14.944	10.781	4.163	0,17
SO ₂	9.903	1.527	8.376	0,34
NO _x	7.243	13.296	-6.054	-0,25
Staub	643	1.474	-831	-0,03
CO	4.237	4.921	-684	-0,03
NM VOC	7.243	13.296	-6.054	-0,25

Quelle: Eigene Berechnungen

5.3 Feste Biomasse (Allgemeine Versorgung)

In den Energieversorgungsunternehmen, die nicht nur Strom, sondern auch Wärme an Dritte liefern (z. B. über Fernwärmenetze), konnte sich der Einsatz fester Biomasse zur ungekoppelten und gekoppelten Wärmeerzeugung erst in den letzten Jahren etablieren. Maßgeblicher Treiber für den Einsatz in gekoppelter Wärmeerzeugung waren die Anreize des Erneuerbare-Energien-Gesetzes.

5.3.1 Endenergiebereitstellung

Die Angabe zur Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in Heiz(kraft)werken der allgemeinen Versorgung wird von der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) übernommen (vgl. Kapitel 2.2.4). Der in Tabelle 75 angegebene Datenstand entspricht der BMWi-Publikation „Erneuerbare Energie in Zahlen - Nationale und internationale Entwicklung (BMWi, 2017), die jährlich im September/Oktobre publiziert wird. Zusätzlich erfolgt zum Jahresende sowie zum Februar/März eine Datenaktualisierung.⁵¹

⁵¹ Die aktuellen Daten in der Zeitreihe ab 1990 sind abrufbar unter: http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html

Entsprechend der Vorgaben der EU-Richtlinie zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (Richtlinie 2009/28/EG, 2009) bezieht sich die angegebene Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in der allgemeinen Versorgung - anders als bei den vorstehenden Angaben zu Haushalten und Industrie - auf die Nettowärmeerzeugung der Heizwerke und Heizkraftwerke abzüglich anteiliger Leitungsverluste im Wärmenetz und der Eigenverbräuche der Erzeugungsanlagen. Letztlich umfassen die Angaben daher die an den Hausübergabestationen an Kunden gelieferten Wärmemengen.

Die Daten beruhen auf den von den statistischen Landesämtern durchgeführten Erhebungen über die Strom- und Wärmeerzeugung in den Heiz(kraft)werken der öffentlichen Versorgung sowie über Erzeugung, Bezug, Verwendung und Abgabe von Wärme. Berichtspflichtig sind alle Betreiber von Heizkraftwerken mit mehr als 1 MW elektrischer Leistung bzw. alle Betreiber von Heizwerken über 2 MW thermischer Leistung, sofern diese in ein Wärmenetz der allgemeinen Versorgung einspeisen. Das Verhältnis von ungekoppelter Wärmeerzeugung in Heizwerken zu gekoppelter Wärmeerzeugung in Heizkraftwerken beträgt etwa 1 zu 4.

Tabelle 75: Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in Heiz(kraft)werken der allgemeinen Versorgung

	2016 [GWh]
feste Biomasse (Allg. Vers.)	6.158

Quelle: (AGEE-Stat, 2017)

5.3.2 Substitutionsfaktoren

Hinsichtlich der Substitutionsbeziehungen der Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in der allgemeinen Versorgung wird angenommen, dass zu 100 % mit fossilen Energieträgern erzeugte Fernwärme ersetzt wird. Es wird also unterstellt, dass mit dem Ausbau von Biomasse-H(K)W kein wesentlicher Impuls zum Ausbau von Wärmenetzen einhergeht. Maßgeblich für diese Annahme ist auch, dass der in den letzten Jahren zum Beispiel durch das Marktanreizprogramm erneuerbarer Energien geförderte Ausbau dezentraler Nahwärmenetze ohnehin nur zu geringen Teilen in Tabelle 75 enthalten ist (vgl. vorstehendes Kapitel). Aus demselben Grund wird auch angenommen, dass die mit der Bereitstellung von fossiler bzw. biogener Fernwärme verbundenen Netzverluste eine ähnliche Größenordnung aufweisen und an dieser Stelle nicht weiter berücksichtigt werden.

Tabelle 76: Substitutionsfaktoren der Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in Heiz(kraft)werken der allgemeinen Versorgung

Technik	Heizöl/Diesel	Erdgas	Steinkohle	Braunkohle	Strom	Fernwärme (ohne Netzverluste)
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
feste Biomasse (Allgemeine Versorgung)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0

Quelle: Eigene Annahme

Die vermiedenen Brutto-Emissionen der Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in Heiz(kraft)werken der allgemeinen Versorgung lassen sich aufbauend auf den dargestellten Substitutionsfaktoren mittels der Brutto-Nutzungsgrade (Mittlung von Kondensations- und KWK-Betrieb) (Tabelle 61) sowie den Emissionsfaktoren der Wärmeerzeugung aus konventionellen Energieträgern (Tabelle 62) berechnen.

Der zugrundeliegende Brennstoffeinsatz an Primärenergieträgern ist in Tabelle 79 dokumentiert. Im Ergebnis verdrängt der Einsatz fester Biomasse zur Erzeugung von Fernwärme zu ca. 54 Prozent Erdgas, zu ca. 33 Prozent Steinkohle und zu ca. 11 Prozent Braunkohle.

Tabelle 77: Fossiler Brennstoffmix für die Erzeugung von Fernwärme

	Erdgas [%]	Steinkohlen [%]	Braunkohlen [%]	Heizöl EL + S [%]
fossiler Fernwärme Mix	54,2	32,4	11,5	1,9

Quelle: UBA auf Basis (AGEB, 2015)

5.3.3 Emissionsfaktoren

Analog zum Vorgehen in den entsprechenden Kapiteln im Stromsektor wurde ein relevanter Referenzfall für die Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in Heiz(kraft)werken der allgemeinen Versorgung mit BioEM modelliert. Während die Vorketten der Brennstoffbereitstellung hierbei von BioEM übernommen wurden, sind die Emissionsfaktoren für den direkten Anlagenbetrieb dem Nationalen Emissionsinventar (UBA, 2017) entnommen. Allerdings liegen die Emissionsfaktoren dort nicht differenziert nach Brennstoffen, sondern nach immissionsrechtlicher Genehmigung der Anlage nach 17. BImSchV, 13. BImSchV, 4. BImSchV (TA-Luft) oder 1. BImSchV vor. Je nach Brennstoffeigenschaften und Luftreinhalteverfahren können die realen Emissionen im Einzelfall daher erheblich von den hier unterstellten, durchschnittlichen Faktoren abweichen.

Auf die Modellierung eines Referenzfalls für die ungekoppelte Wärmerzeugung wird verzichtet, da sich die primärenergetischen Emissionsfaktoren innerhalb eines immissionsrechtlichen Genehmigungsbereichs nicht zwischen Kesseln in Heizkraftwerken und reinen Heizkesseln unterscheiden.

Des Weiteren wird trotz der jüngsten Diskussion um „carbon debts“ bei der energetischen Nutzung von Waldrestholz (Agostini, Giuntoli, & Boulamanti, 2013) angenommen, dass die Entnahme von Waldrestholz aufgrund der nachhaltigen Waldwirtschaft in Deutschland treibhausgasneutral erfolgt, so dass lediglich die energetischen Aufwendungen für die Ernte und den Transport (bei Pellets auch die Brennstoffherstellung) zu Buche schlagen.

Importe biogener Festbrennstoffe sind für die Stromerzeugung und die damit verbundene Bereitstellung von Wärme für die allgemeine Versorgung gegenwärtig noch von untergeordneter Bedeutung. Lediglich bei Anlagen an den Landesgrenzen oder in der Nähe von Seehäfen sind geringe Importe v. a. von Althölzern aus dem europäischen Ausland bekannt.

Zur Ermittlung des thermischen Nutzungsgrads der Referenzfälle für die Wärmebereitstellung aus fester Biomasse für die allgemeine Versorgung wird der Energieeinsatz bei KWK-Anlagen entsprechend der Finnischen Methode auf Strom und Wärme aufgeteilt.

Tabelle 78: Basisannahmen der Referenzfälle für die Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in Heiz(kraft)werken der allgemeinen Versorgung

Brennstoff	Technik ⁵²	Immissionschutz	th. NG (nach Allokation bei KWK gem. Finnischer Methode) [%]	Eigenstrombedarf ⁵³ [%]	Erzeugungsmix ⁵⁴ [%]
Altholz	DT-Entnahmekondensationsmaschine	17. BImSchV	73	2	29,6
Industrierestholz	DT-Entnahmekondensationsmaschine	13. BImSchV	77	2	1,9
Industrierestholz	DT-Entnahmekondensationsmaschine	TA-Luft	77	2	7,5
Industrierestholz	Heizwerk	TA-Luft	47	2	5,4
Pellets (Holz)	Heizwerk	TA-Luft	62	2	3,4
Waldrestholz	DT-Entnahmekondensationsmaschine	TA-Luft	82	2	22,8
Waldrestholz	DT-Entnahmekondensationsmaschine	13. BImSchV	83	2	7,0
Waldrestholz	Organic Rankine Cycle	TA-Luft	83	2	5,3
Waldrestholz	Heizwerk	TA-Luft	62	2	17,1

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis GEMIS 4.94 (IINAS, 2013), (UBA, 2015) und (UBA, et al., 2012)

Tabelle 79: Emissionsfaktoren der Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in Heiz(kraft)werken der allgemeinen Versorgung

Brennstoff / Technik ⁵⁵	CO ₂ -Äq.	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	SO ₂ -Äq.	SO ₂	NO _x	Staub	CO	NMVOC
	[g/kWh]				[g/kWh]					
Altholz										
Vorkette	11,49	10,94	0,02	0,00	0,07	0,01	0,09	0,00	0,02	0,01
Direkte	4,21	0,00	0,04	0,01	0,29	0,05	0,34	0,00	0,07	0,00
Hilfsenergie	10,26	9,70	0,02	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00

⁵² DT- Dampfturbine

⁵³ eigene Annahmen auf Basis BioEM (IFEU, 2016)

⁵⁴ eigene Annahmen auf Basis von (Destatis, 2016b) (Destatis, 2016c)

⁵⁵ DT-EKM- Dampfturbine Entnahmekondenstionsmaschine, ORC- Organic Rankine Cycle

Brennstoff / Technik ⁵⁵	CO ₂ -Äq.	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	SO ₂ -Äq.	SO ₂	NO _x	Staub	CO	NM VOC
		[g/kWh]				[g/kWh]			[g/kWh]	
Industrierestholz										
Vorkette	10,45	10,01	0,01	0,00	0,06	0,01	0,08	0,00	0,01	0,00
Direkte	4,21	0,00	0,04	0,01	0,38	0,03	0,50	0,07	0,21	0,13
Hilfsenergie DT-EKM	9,35	8,85	0,02	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00
Hilfsenergie ORC	9,99	9,45	0,02	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00
Pellets (Holz)										
Vorkette	10,21	9,58	0,01	0,00	0,10	0,03	0,11	0,01	0,06	0,01
Direkte	59,64	0,00	0,00	0,02	0,27	0,02	0,36	0,12	0,40	0,00
Hilfsenergie	7,50	7,10	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
Waldrestholz										
Vorkette	15,68	14,90	0,03	0,00	0,09	0,01	0,12	0,00	0,03	0,01
Direkte	4,21	0,00	0,04	0,01	0,38	0,03	0,50	0,07	0,21	0,13
Hilfsenergie DT-EKM	10,04	9,50	0,02	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00
Hilfsenergie ORC	10,04	9,50	0,02	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00
Hilfsenergie Heizwerk	7,50	7,10	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00

Quelle: UBA auf Basis von BioEM (IFEU, 2016)

5.3.4 Ergebnisse der Emissionsbilanz

Die Netto-Emissionsbilanz der Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in Heiz(kraft)werken der allgemeinen Versorgung errechnet sich aus den oben angegebenen Einzelgrößen (vgl. Tabelle 80).

In Hinblick auf die Wirkungskategorie Treibhausgasemission trägt die Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in den Heiz(kraft)werken der allgemeinen Versorgung zur Vermeidung von ca. 1,5 Mio. t CO₂-Äq. Treibhausgasemissionen bei. Der spezifische Treibhausgas-Vermeidungsfaktor beträgt aufgrund der hohen Substitution von Erdgas ca. 220 g CO₂-Äq. / kWh_{th}.

In Hinblick auf versauernd wirkende Luftschadstoffe ist festzuhalten, dass beim Einsatz fester Biomasse geringere Schwefeldioxidemissionen als beim fossilen Brennstoffmix entstehen. Bei Stickoxiden ist die Emissionsbilanz jedoch negativ. Hinsichtlich weiterer Luftschadstoffe zeigt sich, dass vor allem die Kohlenmonoxid- und NMVOC-Emissionen, aber auch die Staubemissionen teilweise deutlich höher liegen als bei der verdrängten, durch Erdgas dominierten fossilen Fernwärmebereitstellung.

Tabelle 80: Emissionsbilanz der Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in Heiz(kraft)werken der allgemeinen Versorgung

	brutto vermiedene Emissionen [t]	verursachte Emissionen [t]	netto vermiedene Emissionen [t]	Netto-Vermeidungs- faktor [g/kWh]
CO₂-Äq.	1.474.155	120.446	1.353.709	219,82
CO ₂	1.337.652	78.978	1.258.674	204,39
CH ₄	5.051	366	4.685	0,76
N ₂ O	34	71	-37	-0,01
SO₂-Äq.	2.112	2.628	-515	-0,08
SO ₂	1.020	282	737	0,12
NO _x	1.570	3.370	-1.800	-0,29
Staub	352	323	29	0,00
CO	938	1.188	-250	-0,04
NMVOG	1.570	3.370	-1.800	-0,29

Quelle: Eigene Berechnungen

5.4 Flüssige Biomasse

Während die ersten Rapsöl-Blockheizkraftwerke in den 1980er und 1990er Jahren i. d. R. wärmegeführt (d. h. je nach aktuellen Heizenergiebedarf) betrieben wurden, gewann in den Jahren des palmölgetriebenen Ausbaubooms 2005 bis 2008 eine stärker stromgeführte Fahrweise zunehmend an Bedeutung (vgl. Kapitel 4.8). Da die Anlagen jedoch vielfach in Betrieben mit hohem Prozesswärmebedarf (z. B. im Gartenbau oder Gewerbe) installiert wurden, konnten gleichwohl relativ hohe KWK-Anteile realisiert werden.

Mit dem Anstieg der Palmölpreise ab 2009 waren diese Anlagen nicht mehr wirtschaftlich zu betreiben und es kam zu zahlreichen Anlagenstillegungen. Parallel zur Stromerzeugung ging damit auch die Wärmebereitstellung aus Pflanzenöl deutlich zurück (vgl. Kapitel 4.8).

Der Biodieselvebrauch in den Bereichen Landwirtschaft, Militär und Baugewerbe wird aus energiebilanziellen Gründen seit 2014 (rückwirkend bis 2004) von der AGEE-Stat und der AGEB nicht mehr dem Verkehrssektor zugeordnet, sondern im Wärmeverbrauchssektor im Bereich flüssige Biomasse mitverbucht.

5.4.1 Endenergiebereitstellung

Die Angabe zur Wärmebereitstellung aus flüssiger Biomasse wird von der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) übernommen (siehe Kapitel 2.2.1). Der in Tabelle 75 angegebene Datenstand entspricht der BMWi-Publikation „Erneuerbare Energie in Zahlen - Nationale und internationale Entwicklung (BMWi, 2017), die jährlich im September/Oktober publiziert wird. Zusätzlich erfolgt zum Jahresende sowie zum Februar/März eine Datenaktualisierung.⁵⁶

Entsprechend der Vorgaben der EU-Richtlinie (Richtlinie 2009/28/EG, 2009) zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen bezieht sich die angegebene Wärmebereitstellung aus flüssiger Biomasse auf die Nettowärmeerzeugung der Heiz(kraft)werke der allgemeinen Versorgung

⁵⁶ Die aktuellen Daten in der Zeitreihe ab 1990 sind abrufbar unter: http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html

abzüglich anteiliger Leitungsverluste im Wärmenetz und der Eigenverbräuche der Erzeugungsanlagen. Letztlich umfassen die Angaben daher die an den Hausübergabestationen an Kunden gelieferten Wärmemengen. Aufgrund der geringen Leistungen der Pflanzenöl-Blockheizkraftwerke gilt dies allerdings nur für einen Bruchteil der Wärmebereitstellung aus flüssiger Biomasse. Der überwiegende Teil entfällt vielmehr auf den der Wärmeerzeugung aus Pflanzenöl und flüssigen biogenen Abfällen zugeordneten Brennstoffeinsatz in Industrieheizkraftwerken und in Pflanzenöl-Blockheizkraftwerken „sonstiger“ Betreiber unter 1 MW elektrischer Leistung.

Tabelle 81: Wärmebereitstellung aus flüssiger Biomasse und Biodieseleinsatz in der Landwirtschaft

	2016 [GWh]
flüssige Biomasse gesamt	2.052
davon Pflanzenöl	272
davon flüssige Biomasse (Industrie)	218
davon Biodiesel / HVO (Landwirtschaft)	1.562

Quelle: (AGEE-Stat, 2017)

Die Daten beruhen auf den von den statistischen Landesämtern durchgeführten Erhebungen über die Strom- und Wärmeerzeugung in den Heiz(kraft)werken der öffentlichen Versorgung, über Stromerzeugungsanlagen in der Industrie, über die Energieverwendung der Betriebe des verarbeitenden Gewerbes sowie über Erzeugung, Bezug, Verwendung und Abgabe von Wärme. Da die Wärmeauskopplung der „sonstigen“ Betreiber nicht amtlich erfasst wird, hat die AGEE-Stat ein Verfahren entwickelt, um die Wärmeauskopplung aus diesen Anlagen zu berechnen. Wesentliche Grundlage hierfür bilden die von den Übertragungsnetzbetreibern für die Prüfung des Ausgleichmechanismus des EEG durch die Bundesnetzagentur erhobenen EEG-Daten (vgl. (UBA, et al., 2012)).

5.4.2 Substitutionsfaktoren

Da keine verlässlichen Informationen zu den durch Pflanzenöl substituierten fossilen Energieträgern vorliegen, wird an dieser Stelle der von der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen ausgewiesene durchschnittliche Mix der zur Wärmebereitstellung in privaten Haushalten eingesetzten Energieträger ange-setzt. In der Industrie wird flüssige Biomasse zwar in vielen Wirtschaftszweigen eingesetzt, der Schwerpunkt liegt jedoch im Bereich der Papierindustrie. Für diesen Bereich wird daher der von der AGEB in der Energiebilanzzeile 48 ausgewiesene fossile Endenergieverbrauchsmix dieses Wirtschaftszweigs zugrunde gelegt.

Tabelle 82: Substitutionsfaktoren der Wärmebereitstellung aus flüssiger Biomasse und des Biodieseleinsatzes in der Landwirtschaft

	Öl [%]	Gas [%]	Steinkohle [%]	Braunkohle [%]	Fernwärme [%]	Strom [%]
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
Biodiesel / HVO (Landwirtschaft.)	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Quelle: Eigene Setzung in Anlehnung an (AGEB, 2015)

Die vermiedenen Brutto-Emissionen der Wärmebereitstellung aus flüssiger Biomasse und des Biodieseleinsatzes in der Landwirtschaft lassen sich aufbauend auf den dargestellten Substitutionsfaktoren mittels der Brutto-Nutzungsgrade (Mittelung von Kondensations- und KWK-Betrieb) (Tabelle 61) sowie den Emissionsfaktoren der Wärmeerzeugung aus konventionellen Energieträgern (Tabelle 62) berechnen.

5.4.3 Emissionsfaktoren

Die Emissionen bei der Wärmebereitstellung aus flüssiger Biomasse sind im Wesentlichen von drei Einflussfaktoren abhängig:

- ▶ Substrat (Rapsöl vs. Palmöl),
- ▶ Technik und Leistungsgröße der Blockheizkraftwerke,
- ▶ Immissionschutzrechtliche Genehmigung (ab 1 MW Feuerungswärmeleistung bzw. ca. 350 kW_{el} Genehmigungspflicht und damit Art der Abgasnachbehandlung nach BImSchG).

Zum Substrateinsatz liegen Informationen aus (DBFZ, 2015) vor. Während in Anlagen bis 10 kW_{el} ausschließlich Rapsöl zum Einsatz kommt, sind Anlagen ab 150 kW_{el}, auf die derzeit über 80 % der installierten Leistung entfallen, in der Regel nur mit Palmöl wirtschaftlich zu betreiben. Unter Berücksichtigung der höheren Auslastung größerer Anlagen werden insgesamt ca. 95 % Palmöl und lediglich ca. 5 % Rapsöl eingesetzt.

Tabelle 83: Basisannahmen der Referenzfälle für die Wärmebereitstellung aus flüssiger Biomasse

Brennstoff ⁵⁷	Technik ⁵⁸	Immissionschutz	th. NG (nach Allokation bei KWK gem. Finnischer Methode) [%]	Eigenstrombedarf ⁵⁹ [%]	Erzeugungsmix ⁶⁰ [%]
Pflanzenöl (Rapsöl)	Verbrennungsmotor BHKW	TA-Luft	118	2	1,3
Pflanzenöl (Palmöl)	Verbrennungsmotor BHKW	TA-Luft	118	2	11,9
Flüssige biogene Stoffe (Industrie)	DT-Entnahmekondensationsmaschine	13. BImSchV	54	1	10,6
Biodiesel (Landwirtschaft)	Motor		100	0	69,2
HVO (Landwirtschaft)	Motor		100	0	6,9

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis GEMIS 4.94 (IINAS, 2016), BioEM (IFEU, 2016), (UBA, et al., 2012), (BLE, 2016)

Die Verstromung von Pflanzenölen erfolgt überwiegend in umgerüsteten Diesel-Serienmotoren. Die Stromkennzahlen steigen mit zunehmender Anlagenleistung an, d. h. kleinere Blockheizkraftwerke unter 50 kW_{el} erzeugen proportional mehr Wärme als Strom, während größere Aggregate ab 300 bis 400

⁵⁷ HVO -Hydrotreated Vegetable Oils

⁵⁸ DT - Dampfturbine

⁵⁹ eigene Annahmen auf Basis von BioEM (IFEU, 2016)

⁶⁰ eigene Annahmen auf Basis von (UBA, et al., 2012) (BLE, 2016)

kW_{el} Stromkennzahlen von 1,0 erreichen. Da diese Anlagenklasse zudem oftmals knapp unterhalb der Schwelle für eine immissionsschutzrechtliche Genehmigungspflicht liegt, sind nur in wenigen Fällen Techniken zur Abgasnachbehandlung installiert.

Zur Ermittlung des elektrischen Nutzungsgrads der Referenzfälle für die Wärmebereitstellung aus flüssiger Biomasse wird der Energieeinsatz bei KWK-Anlagen entsprechend der Finnischen Methode auf Strom und Wärme aufgeteilt.

Die Datenlage hinsichtlich der Emissionen aus dem realen Betrieb von Pflanzenöl-BHKW ist sehr lückenhaft. In einem Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltbundesamtes wurden die wenigen vorliegenden Emissionserklärungen von Betreibern genehmigungspflichtiger Anlagen aus dem Jahre 2004 analysiert, um brennstoffspezifische Emissionsfaktoren für den direkten Anlagenbetrieb abzuleiten (Degel & Jörß, 2009). Als derzeit beste verfügbare Datenquelle fanden die Ergebnisse auch Eingang in das Nationale Emissionsinventar (UBA, 2017).

Diese direkten Emissionen wurden anschließend um die Vorkettenemissionen aus BioEM (IFEU, 2016) und den abgeleiteten Emissionen aus der fremdbezogenen Hilfsenergie ergänzt. Unter der Annahme von Nutzungsgraden und Stromkennzahlen, die sich aus den EEG-Abrechnungsdaten der Bundesnetzagentur ableiten, ergeben sich die endenergiebezogenen Emissionsfaktoren.

Tabelle 84: Emissionsfaktoren der Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in privaten Haushalten und im GHD-Sektor

Brennstoff / Technik	CO ₂ -Äq.	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	SO ₂ -Äq.	SO ₂	NO _x	Staub	CO	NMVOC
	[g/kWh]				[g/kWh]			[g/kWh]		
Pflanzenöl										
Vorkette	147,05	77,76	0,14	0,22	0,26	0,08	0,26	0,02	0,07	0,02
Rapsöl										
Vorkette	108,36	59,40	0,56	0,12	0,63	0,27	0,51	0,07	0,08	0,02
Palmöl										
Direkte	0,93	0,00	0,01	0,00	0,71	0,00	1,02	0,02	0,14	0,01
Hilfsenergie	7,14	6,75	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
Flüssige biogene Stoffe (Industrie)										
Vorkette	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Direkte	0,93	0,00	0,01	0,00	0,71	0,00	1,02	0,02	0,14	0,01
Hilfsenergie	3,25	3,07	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Biodiesel / HVO										
Vorkette	143,84	93,95	0,26	0,15	0,35	0,13	0,31	0,02	0,07	0,02
Biodiesel										
Vorkette	128,54	78,12	0,61	0,12	0,65	0,27	0,54	0,07	0,10	0,03
HVO										
Direkte	3,30	0,00	0,01	0,01	1,35	0,00	1,94	0,27	1,73	0,35
Hilfsenergie	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Quelle: UBA auf Basis von BioEM (IFEU, 2016)

5.4.4 Ergebnisse der Emissionsbilanz

Die Netto-Emissionsbilanzen der Wärmebereitstellung aus flüssiger Biomasse errechnet sich aus den oben angegebenen Einzelgrößen (vgl. Tabelle 85, Tabelle 86 und Tabelle 87). Sie werden differenziert nach Wärmebereitstellung aus Pflanzenöl, aus flüssiger Biomasse in der Industrie und aus Biodiesel bzw. HVO in der Landwirtschaft.

Im Hinblick auf die Wirkungskategorie Treibhausgasemissionen vermeidet die Wärmebereitstellung aus flüssiger Biomasse (Pflanzenöl) 67.800 t CO₂-Äq. Treibhausgasemissionen mit einem spezifischen Treibhausgas-Vermeidungsfaktor von ca. 250 g CO₂-Äq. / kWh_{th}. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass Emissionen aus Landnutzungsänderungen aufgrund des Anbaus von Energiepflanzen zur Pflanzenölgewinnung nicht enthalten sind (vgl. Kapitel 2.1.3). Flüssige Biomasse, die in der Industrie zur Wärmebereitstellung eingesetzt wird, trägt mit 34.800 t CO₂-Äq. (160 g CO₂-Äq. / kWh_{th}) zur Treibhausgasvermeidung bei. Durch den im Bereich Landwirtschaft eingesetzten Biodiesel bzw. eingesetztem HVO werden ca. 243.000 t CO₂-Äq. Treibhausgasemissionen vermieden. Entsprechend den Verbrauchsmengen ergibt sich ein Treibhausgas-Vermeidungsfaktor von netto 156 g CO₂-Äq. / kWh_{th}.

In Hinblick auf versauernd wirkende Luftschadstoffe zeigt sich, dass insbesondere die Emissionen von Stickoxiden bei der Wärmebereitstellung aus flüssiger Biomasse sehr hoch sind. Auch die Emissionsbilanzen von Staub und flüchtigen organischen Verbindungen sind negativ.

Tabelle 85: Emissionsbilanz der Wärmebereitstellung aus Pflanzenöl

	brutto vermiedene Emissionen [t]	verursachte Emissionen [t]	netto vermiedene Emissionen [t]	Netto-Vermeidungs- faktor [g/kWh]
CO₂-Äq.	98.615	30.791	67.824	249,26
CO ₂	93.422	16.663	76.759	282,10
CH ₄	189	145	44	0,16
N ₂ O	2	35	-34	-0,12
SO₂-Äq.	89	354	-264	-0,97
SO ₂	33	68	-36	-0,13
NO _x	82	410	-328	-1,21
Staub	8	24	-16	-0,06
CO	76	61	15	0,06
NMVOG	82	410	-328	-1,21

Quelle: Eigene Berechnungen

Tabelle 86: Emissionsbilanz der Wärmebereitstellung aus flüssiger Biomasse (Industrie)

	brutto vermiedene Emissionen [t]	verursachte Emissionen [t]	netto vermiedene Emissionen [t]	Netto-Vermeidungs- faktor [g/kWh]
CO₂-Äq.	34.970	202	34.767	159,76
CO ₂	32.166	0	32.166	147,81
CH ₄	103	2	101	0,46
N ₂ O	1	0	0	0,00
SO₂-Äq.	41	154	-114	-0,52
SO ₂	18	0	18	0,08

	brutto vermiedene Emissionen [t]	verursachte Emissionen [t]	netto vermiedene Emissionen [t]	Netto-Vermeidungs- faktor [g/kWh]
NO_x	32	221	-189	-0,87
Staub	6	5	1	0,00
CO	73	31	42	0,19
NMVOG	32	221	-189	-0,87

Quelle: Eigene Berechnungen

Tabelle 87: Emissionsbilanz des Biodiesel und HVO-Einsatzes in der Landwirtschaft

	brutto vermiedene Emissionen [t]	verursachte Emissionen [t]	netto vermiedene Emissionen [t]	Netto-Vermeidungs- faktor [g/kWh]
CO₂-Äq.	470.778	227.716	243.061	155,58
CO₂	467.318	144.536	322.781	206,61
CH₄	116	474	-358	-0,23
N₂O	2	239	-238	-0,15
SO₂-Äq.	535	2.692	-2.157	-1,38
SO₂	324	224	100	0,06
NO_x	304	3.547	-3.243	-2,08
Staub	44	464	-420	-0,27
CO	146	2.814	-2.669	-1,71
NMVOG	304	3.547	-3.243	-2,08

Quelle: Eigene Berechnungen

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

Mit der Einführung des KWK-Bonus im Zuge der Novelle des EEG 2004 ist die Auskopplung von Nutzwärme aus Biogasanlagen stetig angestiegen. Seit dem EEG 2012 ist eine Mindestwärmenutzung (Fermenterbeheizung eingeschlossen) von 60 % verpflichtend, sofern nicht eine Direktvermarktung des produzierten Stroms erfolgt.

Parallel zu der dynamischen Entwicklung der Stromerzeugung aus Biogas hat dies dazu geführt, dass auch die absolute Wärmebereitstellung aus Biogas in den letzten Jahren zugenommen hat. Begünstigt wurde diese Entwicklung auch durch die Förderung von Wärmenetzen und Mikrogasleitungen über Marktanzreizprogramme erneuerbarer Energien sowie durch Förderprogramme für Bioenergiedörfer und -regionen.

Biomethan, d. h. auf Erdgasqualität aufbereitetes, ins Erdgasnetz eingespeistes Biogas, wird bisher außer im Verkehrssektor zu mehr als 80 Prozent ebenfalls zur Strom- und Wärmeerzeugung in Blockheizkraftwerken verwendet. Da überwiegend wärmegeführte Blockheizkraftwerke auf Biomethan umgestellt wurden, die zur Abdeckung der Grundlast von Schwimmbädern, kommunalen Gebäuden etc. dienen, ist hier ein sehr hoher Wärmenutzungsgrad von über 90 Prozent anzunehmen.

Die Wärmebereitstellung aus Klär- und Deponiegas umfasst im Wesentlichen die Nutzung für die Beheizung der Faultürme (in Kläranlagen) und in geringem Umfang für die Beheizung von Betriebsgebäuden. Die Abgabe der Wärme in Wärmenetze oder direkt an Wärmeverbraucher bildet aufgrund der abgelegenen Lage von Kläranlagen und Deponien eher die Ausnahme.

5.5.1 Endenergiebereitstellung

Die Angabe zur Wärmebereitstellung aus gasförmiger Biomasse wird von der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) übernommen (vgl. Kapitel 2.2.1). Der in Tabelle 88 angegebene Datenstand entspricht der BMWi-Publikation „Erneuerbare Energie in Zahlen - Nationale und internationale Entwicklung (BMWi, 2017), die jährlich im September/Oktober publiziert wird. Zusätzlich erfolgt zum Jahresende sowie zum Februar/März eine Datenaktualisierung.⁶¹

Entsprechend der Vorgaben der EU-Richtlinie zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (Richtlinie 2009/28/EG, 2009) bezieht sich die angegebene Wärmebereitstellung aus gasförmiger Biomasse - anders als bei den vorstehenden Angaben zu Haushalten und Industrie - auf die Nettowärmeerzeugung der Heiz(kraft)werke der allgemeinen Versorgung abzüglich anteiliger Leitungsverluste im Wärmenetz und der Eigenverbräuche der Erzeugungsanlagen. Letztlich umfassen die Angaben daher die an den Hausübergabestationen an Kunden gelieferten Wärmemengen. Aufgrund der geringen Leistungen der Blockheizkraftwerke gilt dies allerdings nur für einen Bruchteil der Wärmebereitstellung. Der überwiegende Teil entfällt vielmehr auf den der Wärmeerzeugung zugeordneten Brennstoffeinsatz in Industrieheizkraftwerken und vor allem Blockheizkraftwerken „sonstiger“ Betreiber unter 1 MW elektrischer Leistung.

Die Daten beruhen auf den von den statistischen Landesämtern durchgeführten Erhebungen über die Strom- und Wärmeerzeugung in den Heiz(kraft)werken der öffentlichen Versorgung, über Stromerzeugungsanlagen in der Industrie, über die Energieverwendung der Betriebe des verarbeitenden Gewerbes sowie über Erzeugung, Bezug, Verwendung und Abgabe von Wärme. Da die Wärmeauskopplung der „sonstigen“ Betreiber nicht amtlich erfasst wird, hat die AGEE-Stat ein Verfahren entwickelt, um die Wärmeauskopplung aus diesen Anlagen zu berechnen. Wesentliche Grundlage hierfür bilden die von den Übertragungsnetzbetreibern im Zuge der Prüfung des Ausgleichsmechanismus des EEG durch die Bundesnetzagentur erhobenen EEG-Daten (vgl. (UBA, et al., 2012)).

Tabelle 88: Wärmebereitstellung aus gasförmiger Biomasse

	2016 [GWh]
gasförmige Biomasse gesamt	19.136
davon Biogas	14.111
davon Biomethan	2.821
davon Klärgas	2.078
davon Deponiegas	128

Quelle: (AGEE-Stat, 2017)

5.5.2 Substitutionsfaktoren

Die überwiegende Zahl der Biogasanlagen wurde von Landwirten im Außenbereich von Siedlungen oder auf dem eigenen Betriebsgelände errichtet. Nach Angaben des (DBFZ, 2015) stellen die Beheizung von Sozialgebäuden, Werkstätten und Ställen sowie Trocknungsprozesse nach wie vor die häufigste Verwendungsart der Wärme aus Biogas dar. Daneben gab es in den letzten Jahren einen Trend zur zunehmenden Wärmeeinspeisung in Nahwärmenetze im ländlichen Raum. Aus pragmatischen Gründen wird zur Ableitung der Substitutionsbeziehungen jedoch bis auf Weiteres der durchschnittli-

⁶¹ Die aktuellen Daten in der Zeitreihe ab 1990 sind abrufbar unter: http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html

che fossile Energieträgermix in der Landwirtschaft bzw. des Gartenbaus herangezogen. Da keine Informationen über alternative Energieträger bei Kläranlagen und Deponien vorliegen, wird dieser verdrängte Energieträgermix auch auf diese Bereiche angewandt.

Unter dieser Annahme substituiert die Wärmebereitstellung aus gasförmiger Biomasse überwiegend Heizöl (ca. 56 %) und Erdgas (ca. 42 %). Auch Steinkohlenkoks spielt noch eine kleine Rolle, zum Beispiel in größeren Gartenbaubetrieben.

Tabelle 89: Substitutionsfaktoren der Wärmebereitstellung aus gasförmiger Biomasse

	Öl [%]	Gas [%]	Steinkohle [%]	Braunkohle [%]	Fernwärme [%]	Strom [%]
Biogas / Biomethan	56,3	42,4	1,3	0,0	0,0	0,0
Klärgas	56,3	42,4	1,3	0,0	0,0	0,0
Deponiegas	56,3	42,4	1,3	0,0	0,0	0,0

Quelle: eigene Setzung in Anlehnung an (DBFZ, 2015)

Die vermiedenen Brutto-Emissionen der Wärmebereitstellung aus gasförmiger Biomasse lassen sich aufbauend auf den dargestellten Substitutionsfaktoren mittels der Brutto-Nutzungsgrade (Mittelung von Kondensations- und KWK-Betrieb) (Tabelle 61) sowie den Emissionsfaktoren der Wärmerzeugung aus konventionellen Energieträgern (Tabelle 62) berechnen.

5.5.3 Emissionsfaktoren

Die mit der Wärmebereitstellung aus gasförmiger Biomasse verbundenen Luftemissionen sind von einer Vielzahl von Einflussfaktoren abhängig (vgl. (UBA, et al., 2012)). Eine Erläuterung der wichtigsten Faktoren befindet sich bereits in Kapitel 4.7.

Aus Gründen der Konsistenz mit Kapitel 4.7 wird zur Abschätzung von Emissionsfaktoren für die Wärmebereitstellung aus gasförmiger Biomasse ein konservatives Vorgehen gewählt, das sich wesentlich auf vorliegende Emissionserklärungen genehmigungspflichtiger Blockheizkraftwerke stützt. In einem Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltbundesamtes wurden entsprechende Angaben aus dem Jahre 2004 analysiert, um brennstoffspezifische Emissionsfaktoren für den direkten Anlagenbetrieb abzuleiten (Degel & Jörß, 2009). Auch wenn die Daten wegen der geringen Anzahl erfasster Anlagen mit zum Teil hohen Unsicherheiten verbunden sind, fanden sie als beste verfügbare Datenquellen Eingang in das Nationale Emissionsinventar (UBA, 2017). Für Biomethan für die Annahme zugrunde gelegt, dass das in das Gasnetz eingespeiste Biomethan Erdgasqualität besitzt. Vor der Einspeisung anfallende Methanemissionen werden der Vorkette zugerechnet, sodass der direkte Emissionsfaktor für Biomethan dem direkten Emissionsfaktor für Erdgas entspricht.

Als weitere potenzielle Quellen für anlagenbezogene diffuse Methan- und sonstigen Luftemissionen sind die Dichtheit des Gärrestlagers und des Gasspeichers, der Motorschlupf des BHKWs, das Vorhandensein von Überdrucksicherungen (Notfackel) und Oxidationskatalysatoren zu nennen (vgl. UBA, et al., 2012). Allgemein sind größere Biogasanlagen, die für ca. drei Viertel der Stromerzeugung aus Biogas stehen, aufgrund der spezifischen Investitionskosten im Verhältnis zum Ertrag, vor allem aber aufgrund der immissionschutzrechtlichen Genehmigungspflicht von Biogasanlagen in der Regel mit Einrichtungen zur Abgasnachbehandlung, mit Gasfackeln und gasdicht abgedecktem Gärrestlager ausgestattet. Aus diesem Grund werden sämtliche Methanemissionen aus Gärrestlagern (Abschätzung nach (TI, 2016)) die beim direkten Betrieb anfallenden nach Baurecht genehmigten Anlagen zugeordnet

Anschließend werden die direkten Emissionsfaktoren mit den aus BioEM abgeleiteten vorkettenspezifischen Emissionsfaktoren und den Emissionen aus dem Fremdbezug von Hilfsenergie ergänzt. Die

weitere Umrechnung in die funktionelle Einheit Endenergie kWh_{el} erfolgte unter Berücksichtigung repräsentativer Erkenntnisse der AGEE-Stat, des UBA und des DBFZ zu durchschnittlichen Jahresnutzungsgraden, Eigenstrombedarfen und zum Umfang der externen Wärmenutzung als Basis für die Allokation der Primärenergie auf Strom und Wärme auf Basis der Finnischen Methode.

Tabelle 90: Basisannahmen der verwendeten Ökobilanz-Datensätze für die Wärmebereitstellung aus gasförmiger Biomasse

Brennstoff	Technik ⁶²	Immissionschutz	th. NG (nach Allokation bei KWK gem. Finnischer Methode) [%]	Eigenstrombedarf ⁶³ [%]	Erzeugungsmix ⁶⁴ [%]
Biogas (Energiepflanzen)	Verbrennungsmotor BHKW	TA-Luft	113	2	35,6
Biogas (Energiepflanzen)	Verbrennungsmotor BHKW	nach Baurecht genehmigt	113	2	22,6
Biogas (Gülle)	Verbrennungsmotor BHKW	TA-Luft	113	2	6,0
Biogas (Gülle)	Verbrennungsmotor BHKW	Nach Baurecht genehmigt	113	2	4,3
Biogas (Abfall, Reststoff)	Verbrennungsmotor BHKW	nach Baurecht genehmigt	113	2	5,2
Biomethan (Energiepflanzen)	Verbrennungsmotor BHKW	TA-Luft	105	2	13,0
Biomethan (Gülle)	Verbrennungsmotor BHKW	13. BImSchV	105	2	1,3
Biomethan (Abfall, Reststoff)	Verbrennungsmotor BHKW	TA-Luft	105	2	0,4
Klärgas	Verbrennungsmotor BHKW	TA-Luft	88	2	8,3
Klärgas	Kessel		100	2	2,6
Deponiegas	Verbrennungsmotor BHKW	TA-Luft	114	2	0,7

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis (UBA, et al., 2012), BioEm (IFEU, 2016), (DBFZ, 2015) und Destatis (Destatis, 2016c) (Destatis, 2016b)

⁶² BHKW: Blockheizkraftwerk

⁶³ eigene Annahmen auf Basis von BioEm (IFEU, 2016)

⁶⁴ eigene Annahmen auf Basis von (DBFZ, 2015) und Destatis (Destatis, 2016c) (Destatis, 2016b)

Tabelle 91: Emissionsfaktoren der Wärmebereitstellung aus gasförmiger Biomasse

Brennstoff / Technik ⁶⁵	CO ₂ -Äq.	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	SO ₂ -Äq.	SO ₂	NO _x	Staub	CO	NMVOC
		[g/kWh]				[g/kWh]			[g/kWh]	
Biogas (Energiepflanzen)										
Vorkette	72,83	20,45	0,76	0,11	0,10	0,02	0,12	0,01	0,04	0,01
Direkte VM TA-Luft	51,48	0,00	1,99	0,01	0,70	0,28	0,60	0,02	0,55	0,03
Direkte VM Baurecht	122,35	0,00	4,83	0,01	0,70	0,28	0,60	0,02	0,55	0,03
Hilfsenergie	6,82	6,45	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
Biogas (Gülle)										
Vorkette	20,52	2,42	0,72	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00
Direkte	51,48	0,00	1,99	0,01	0,70	0,28	0,60	0,02	0,55	0,03
Hilfsenergie	6,82	6,45	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
Biogas (Abfall, Reststoff)										
Vorkette	19,55	1,49	0,72	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
Direkte	51,48	0,00	1,99	0,01	0,70	0,28	0,60	0,02	0,55	0,03
Hilfsenergie	6,82	6,45	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
Biomethan (Energiepflanzen)										
Vorkette	129,79	67,68	0,95	0,13	0,32	0,12	0,29	0,01	0,07	0,01
Direkte	25,47	0,00	0,98	0,00	0,15	0,00	0,21	0,00	0,13	0,01
Hilfsenergie	6,33	5,99	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
Biomethan (Gülle)										
Vorkette	70,70	47,16	0,92	0,00	0,22	0,10	0,18	0,01	0,03	0,00
Direkte	25,47	0,00	0,98	0,00	0,15	0,00	0,21	0,00	0,13	0,01
Hilfsenergie	6,33	5,99	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
Biomethan (Abfall, Reststoff)										
Vorkette	3,08	0,16	0,11	0,00	0,02	0,00	0,03	0,00	0,02	0,00
Direkte	25,47	0,00	0,98	0,00	0,15	0,00	0,21	0,00	0,13	0,01
Hilfsenergie	6,33	5,99	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
Klärgas										
Vorkette	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Direkte	29,76	0,00	1,12	0,01	0,42	0,11	0,44	0,02	0,65	0,06

⁶⁵ VM TA –Luft – Verbrennungsmotor nach der technischen Anleitung zur Reinhaltung von Luft (TA Luft)

Brennstoff / Technik ⁶⁵	CO ₂ -Äq.	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	SO ₂ -Äq.	SO ₂	NO _x	Staub	CO	NMVOC
	[g/kWh]				[g/kWh]			[g/kWh]		
Hilfsenergie Kessel	6,05	5,72	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
Hilfsenergie VM TA-Luft	5,31	5,02	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Deponiegas										
Vorkette	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Direkte	29,76	0,00	1,12	0,01	0,42	0,14	0,40	0,00	0,64	0,03
Hilfsenergie	6,92	6,54	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00

Quelle: UBA auf Basis von BioEM (IFEU, 2016)

5.5.4 Ergebnisse der Emissionsbilanz

Die Netto-Emissionsbilanzen der Wärmebereitstellung aus gasförmiger Biomasse errechnet sich aus den oben angegebenen Einzelgrößen (vgl. Tabelle 92, Tabelle 93, Tabelle 94).

Die in Kapitel 4.7 dargelegte, schwierige Datenlage hat jedoch zur Folge, dass die Emissionsbilanzierung von gasförmiger Biomasse derzeit nur mit erheblichen Unsicherheiten abgebildet werden kann.

Unter den genannten Bedingungen trägt die Wärmebereitstellung aus gasförmiger Biomasse insgesamt mit knapp 4 Mio. t CO₂-Äq. vermiedenen Treibhausgasemissionen zum Klimaschutz bei. Hiervon sind ca. 86 Prozent auf die Wärmebereitstellung aus Biogas und Biomethan und ca. 14 Prozent auf die Wärmebereitstellung aus Klär- bzw. Deponiegas zurückzuführen.

Die Relevanz der Vorkettenemissionen für den Energiepflanzenanbau zeigt sich in der deutlichen Differenz zwischen dem spezifischen Treibhausgas-Vermeidungsfaktor (ohne Landnutzungsänderungen, vgl. Kapitel 2.1.3) von Biogas von knapp 190 g CO₂-Äq. / kWh_{th} im Vergleich zu denjenigen von Biomethan, Klär- und Deponiegas (156, 232 bzw. 300 g CO₂-Äq. / kWh_{th}) (vgl. Tabelle 92, Tabelle 93, Tabelle 94). Aufgrund der heterogenen Zusammensetzung des Rohbiogases ist zudem die Bilanz der sonstigen Luftschadstoffe gegenüber den verdrängten fossilen Energieträgern (vor allem Heizöl) negativ.

Ausnahmen bilden lediglich Schwefeldioxid sowie Staub bei den Klär- und Deponiegasen. Hinsichtlich der klassischen Säurebildner SO₂ und NO_x ist allerdings anzumerken, dass vermiedene NH₃-Emissionen aus alternativer Güllelagerung und -ausbringung aufgrund der in Kapitel 2.1.3 dargelegten Systemgrenzen an dieser Stelle nicht berücksichtigt werden konnten. Weiterhin sind diffuse Methanemissionen der Deponien nicht in der Emissionsbilanzierung berücksichtigt.

Tabelle 92: Emissionsbilanz der Wärmebereitstellung aus Biogas

	brutto vermiedene Emissionen [t]	verursachte Emissionen [t]	netto vermiedene Emissionen [t]	Netto-Vermeidungsfaktor [g/kWh]
CO ₂ -Äq.	4.592.218	1.904.686	2.687.533	190,46
CO ₂	4.423.183	234.201	4.188.982	296,87
CH ₄	6.160	50.962	-44.802	-3,18
N ₂ O	50	1.330	-1.280	-0,09

	brutto vermiedene Emissionen [t]	verursachte Emissionen [t]	netto vermiedene Emissionen [t]	Netto-Vermeidungs- faktor [g/kWh]
SO₂-Äq.	4.038	11.031	-6.993	-0,50
SO ₂	1.466	4.167	-2.701	-0,19
NO _x	3.696	9.862	-6.166	-0,44
Staub	246	361	-115	-0,01
CO	2.219	8.178	-5.960	-0,42
NMVOG	3.696	9.862	-6.166	-0,44

Quelle: Eigene Berechnungen

Tabelle 93: Emissionsbilanz der Wärmebereitstellung aus Biomethan

	brutto vermiedene Emissionen [t]	verursachte Emissionen [t]	netto vermiedene Emissionen [t]	Netto-Vermeidungs- faktor [g/kWh]
CO₂-Äq.	853.123	412.284	440.838	156,27
CO ₂	821.720	180.006	641.714	227,47
CH ₄	1.144	5.366	-4.221	-1,50
N ₂ O	9	329	-320	-0,11
SO₂-Äq.	750	1.272	-521	-0,18
SO ₂	272	323	-50	-0,02
NO _x	687	1.363	-677	-0,24
Staub	46	40	5	0,00
CO	412	544	-132	-0,05
NMVOG	687	1.363	-677	-0,24

Quelle: Eigene Berechnungen

Tabelle 94: Emissionsbilanz der Wärmebereitstellung aus Klärgas

	brutto vermiedene Emissionen [t]	verursachte Emissionen [t]	netto vermiedene Emissionen [t]	Netto-Vermeidungs- faktor [g/kWh]
CO₂-Äq.	544.763	61.847	482.916	232,35
CO ₂	524.711	0	524.711	252,46
CH ₄	731	2.337	-1.606	-0,77
N ₂ O	6	12	-6	0,00
SO₂-Äq.	479	865	-386	-0,19
SO ₂	174	224	-51	-0,02
NO _x	438	920	-482	-0,23
Staub	29	32	-3	0,00
CO	263	1.347	-1.084	-0,52
NMVOG	438	920	-482	-0,23

Quelle: Eigene Berechnungen

Tabelle 95: Emissionsbilanz der Wärmebereitstellung aus Deponiegas

	brutto vermiedene Emissionen [t]	verursachte Emissionen [t]	netto vermiedene Emissionen [t]	Netto-Vermeidungs- faktor [g/kWh]
CO₂-Äq.	42.386	3.819	38.567	300,51
CO ₂	40.825	0	40.825	318,11
CH ₄	57	144	-87	-0,68
N ₂ O	0	1	0	0,00
SO₂-Äq.	37	54	-17	-0,13
SO ₂	14	18	-5	-0,04
NO _x	34	51	-17	-0,13
Staub	2	0	2	0,01
CO	20	83	-62	-0,48
NMVOG	34	51	-17	-0,13

Quelle: Eigene Berechnungen

5.6 Biogener Anteil des Siedlungsabfalls

Durch das Verbot der Deponierung unbehandelter Siedlungsabfälle ab 2005 hat die energetische Verwertung des Siedlungsabfalls stark zugenommen. Die Wärmebereitstellung aus dem biologisch abbaubaren bzw. biogenen Anteil des Siedlungsabfalls wird im Einklang mit der EU-Verordnung über die Energiestatistik VO 1099/2008 und der Richtlinie zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (Richtlinie 2009/28/EG, 2009) als erneuerbare Energie ausgewiesen. Auf der Grundlage eines Fachgutachtens der TU Dresden im Auftrag des Umweltbundesamtes wird der biogene Anteil des Siedlungsabfalls auf Bundesebene mit 50 % (energetisch) angesetzt (Hofmann, 2010) dies steht im Einklang mit dem Mengengerüst der erneuerbaren Energien für die Erstellung der nationalen Daten sowie der internationalen Berichtspflichten.

5.6.1 Endenergiebereitstellung

Die Angabe zur Wärmebereitstellung aus dem biogenen Anteil im Siedlungsabfall wird von der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) übernommen (siehe Kapitel 2.2.1). Der in Tabelle 95 angegebene Datenstand entspricht der BMWi-Publikation „Erneuerbare Energie in Zahlen - Nationale und internationale Entwicklung (BMWi, 2017), die jährlich im September/Oktober publiziert wird. Zusätzlich erfolgt zum Jahresende sowie zum Februar/März eine Datenaktualisierung.⁶⁶

Entsprechend der Vorgaben der EU-Richtlinie zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (Richtlinie 2009/28/EG) bezieht sich die angegebene Wärmebereitstellung aus dem biogenen Anteil des Siedlungsabfalls in den Heiz(kraft)werken der allgemeinen Versorgung (anders als bei den vorstehenden Angaben zu Haushalten und Industrie) auf die Nettowärmeerzeugung der Heizwerke und Heizkraftwerke abzüglich anteiliger Leitungsverluste im Wärmenetz und der Eigenverbräuche der Erzeugungsanlagen. Letztlich umfassen die Angaben daher die an den Hausübergabestationen an Kunden gelieferten Wärmemengen. Hinzu kommt der Anteil des Brennstoffeinsatzes in Industrieheizkraftwerken, der der Wärmeerzeugung zuzuordnen ist.

⁶⁶ Die aktuellen Daten in der Zeitreihe ab 1990 sind abrufbar unter: http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html

Die Daten beruhen auf den von den statistischen Landesämtern durchgeführten Erhebungen über die Strom- und Wärmeerzeugung in den Heiz(kraft)werken der öffentlichen Versorgung, über Stromerzeugungsanlagen in der Industrie, über die Energieverwendung der Betriebe des verarbeitenden Gewerbes sowie über Erzeugung, Bezug, Verwendung und Abgabe von Wärme. Berichtspflichtig sind alle Betreiber von Heizkraftwerken mit mehr als 1 MW elektrischer Leistung bzw. alle Betreiber von Heizwerken über 2 MW thermischer Leistung, sofern diese in ein Wärmenetz der allgemeinen Versorgung einspeisen.

Tabelle 96: Wärmebereitstellung aus dem biogenen Anteil des Siedlungsabfalls

	2016 [GWh]
Biogener Anteil des Siedlungsabfalls	11.933

Quelle: (AGEE-Stat, 2017)

5.6.2 Substitutionsfaktoren

Hinsichtlich der Substitutionsbeziehungen der Wärmebereitstellung aus dem biogenen Anteil des Siedlungsabfalls wird angenommen, dass zu 100 % mit fossilen Energieträgern erzeugte Fernwärme ersetzt wird. Es wird also unterstellt, dass durch die Wärmebereitstellung aus dem biogenen Anteil des Abfalls kein wesentlicher Impuls zum Ausbau von Wärmenetzen einhergeht. Dies bedeutet auch, dass die mit der Bereitstellung von fossiler bzw. biogener Fernwärme verbundenen Netzverluste die gleiche Größenordnung aufweisen und an dieser Stelle nicht weiter berücksichtigt werden.

Tabelle 97: Substitutionsfaktoren der Wärmebereitstellung aus dem biogenen Anteil des Siedlungsabfalls

	Öl [%]	Gas [%]	Steinkohle [%]	Braunkohle [%]	Fernwärme [%]	Strom [%]
Biogener Abfall H(K)W	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0

Quelle: Eigene Setzung

Die vermiedenen Brutto-Emissionen der Wärmebereitstellung aus dem biogenen Anteil des Siedlungsabfalls lassen sich aufbauend auf den dargestellten Substitutionsfaktoren mittels der Brutto-Nutzungsgrade (Mittelung von Kondensations- und KWK-Betrieb) (Tabelle 61) sowie den Emissionsfaktoren der Wärmeerzeugung aus konventionellen Energieträgern (Tabelle 62) berechnen.

5.6.3 Emissionsfaktoren

Die Emissionsfaktoren für die Wärmebereitstellung aus Siedlungsabfällen sind nachfolgend dokumentiert. Sie werden dem Nationalen Emissionsinventar des Umweltbundesamtes entnommen und liegen dort je Einheit Primärenergie vor. Die Faktoren wurden in GEMIS 4.94 (IINAS, 2016) importiert und über Angaben der AGEE-Stat zur Aufteilung des Brennstoffeinsatzes auf Strom und Wärme im Zuge der Finnischen Methode alloziert.

Emissionen aus der Vorkette und der benötigten fremdbezogenen Hilfsenergie werden per Definition gleich Null gesetzt, da die Aufwendungen zur Sammlung der Siedlungsabfälle ohnehin angefallen wären, d. h. auch bei einer bis zum Jahr 2005 zulässigen Deponierung. Verbleibende Emissionen aus der Zufuhr der Siedlungsabfälle im Heiz(kraft)werk sowie die Emissionen aus der Herstellung des Heiz(kraft)werks sind über den gesamten Lebenszyklus so gering, dass von einer Bilanzierung abgesehen wird.

Tabelle 98: Basisannahmen der Referenzfälle für die Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in Heiz(kraft)werken der allgemeinen Versorgung

Brennstoff	Technik	Immissionschutz	th. NG (nach Allokation bei KWK gem. Finnischer Methode) [%]	Eigenstrombedarf ⁶⁷ [%]	Erzeugungsmix [%]
biogener Anteil des Abfalls	DT ⁶⁸ -Entnahmekondensationsmaschine	17. BImSchV	68	2	100

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis GEMIS 4.94 (IINAS, 2013), (UBA, 2015) und (UBA, et al., 2012)

Tabelle 99: Emissionsfaktoren der Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in Heiz(kraft)werken der allgemeinen Versorgung

Brennstoff / Technik	CO ₂ - Äq.	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	SO ₂ - Äq.	SO ₂	NO _x	Staub	CO	NMVOC
	[g/kWh]				[g/kWh]				[g/kWh]	
biogener Anteil des Abfalls										
Vorkette	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Direkte	1,45	0,00	0,01	0,00	0,13	0,01	0,18	0,00	0,02	0,00
Hilfsenergie	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Quelle: GEMIS 4.94 (IINAS, 2016)

5.6.4 Ergebnisse der Emissionsbilanz

Die Netto-Emissionsbilanz der Wärmebereitstellung aus dem biogenen Anteil des Siedlungsabfalls errechnet sich aus den oben angegebenen Einzelgrößen (vgl. Tabelle 99).

Die Wärmebereitstellung aus dem biogenen Anteil des Siedlungsabfalls trägt demnach mit knapp 2,7 Mio. t CO₂-Äq. vermiedenen Treibhausgasemissionen zum Klimaschutz bei. Der spezifische Treibhausgas-Vermeidungsfaktor liegt wie bei allen Abfallstoffen relativ hoch bei ca. 223 g CO₂-Äq. / kWh_{th}.

Tabelle 100: Emissionsbilanz der Wärmebereitstellung aus dem biogenen Anteil des Siedlungsabfalls

	brutto vermiedene Emissionen [t]	verursachte Emissionen [t]	netto vermiedene Emissionen [t]	Netto-Vermeidungs- faktor [g/kWh]
CO₂-Äq.	2.673.692	17.295	2.656.398	222,62
CO₂	2.426.116	0	2.426.116	203,32
CH₄	9.162	77	9.084	0,76
N₂O	62	52	11	0,00

⁶⁷ eigene Annahmen auf der Basis von (Destatis, 2016)

⁶⁸ DT: Dampfturbine

	brutto vermiedene Emissionen [t]	verursachte Emissionen [t]	netto vermiedene Emissionen [t]	Netto-Vermeidungs- faktor [g/kWh]
SO₂-Äq.	3.831	1.602	2.229	0,19
SO₂	1.849	137	1.712	0,14
NO_x	2.848	2.105	743	0,06
Staub	639	10	629	0,05
CO	1.701	206	1.495	0,13
NMVOC	2.848	2.105	743	0,06

Quelle: Eigene Berechnungen

Die Emissionsbilanz in Bezug auf versauernd wirkende Luftschadstoffe und weitere Schadstoffe wie Staub und flüchtige organischen Verbindungen ist aufgrund der hohen Anforderungen der 17. BImSchV an Abfallverbrennungsanlagen hingegen leicht positiv.

5.7 Solarthermie

Die Nutzung der Solarthermie zur Erzeugung von Warmwasser wird zum Beispiel in Schwimmbädern oder durch einfache Thermosiphonsysteme seit Jahrzehnten praktiziert. Im Unterschied zu unverglasten Systemen, die im Wesentlichen aus schwarzen Kunststoffrohren bestehen, wurden in Deutschland insbesondere seit Mitte der 1990er Jahre in erheblichem Umfang verglaste Kollektorsysteme installiert. Diese Systeme ermöglichen eine erhebliche Temperaturerhöhung gegenüber der Umgebung und lassen sich im Wesentlichen in Hinblick auf die Bauart der Kollektoren und den Einsatzbereich unterscheiden. Im Gegensatz zu den weltweit vorherrschenden Vakuumröhrenkollektoren dominieren in Deutschland Flachkollektoren mit einem Anteil von mehr als 80 Prozent den Anlagenbestand (vgl. Tabelle 102). Bis Ende der 1990er Jahre waren Anlagen zur ausschließlichen Warmwassererzeugung die Regel. Seit dem Jahr 2000 fanden jedoch immer mehr so genannte Kombisysteme zur Warmwassererzeugung und Heizungsunterstützung Verbreitung (Simon & O'Sullivan, 2012).

5.7.1 Endenergiebereitstellung

Die Angabe zur Wärmebereitstellung aus Solarthermie wird von der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) übernommen (siehe Kapitel 2.2.1). Der in Tabelle 100 angegebene Datenstand entspricht der BMWi-Publikation „Erneuerbare Energie in Zahlen - Nationale und internationale Entwicklung (BMWi, 2017), die jährlich im September/Oktober publiziert wird. Zusätzlich erfolgt zum Jahresende sowie zum Februar/März eine Datenaktualisierung.⁶⁹

Die Angaben beziehen sich auf die Wärmemenge, die aus den solarthermischen Kollektoren an das zentrale Verteil- bzw. Speichersystem geliefert wurde. Sie basieren auf einer Zeitreihe der AGEE-Stat zur Entwicklung der solarthermischen Kollektorfläche bzw. der korrespondierenden solarthermischen Leistung. Zur Aktualisierung fließen die jährlich veröffentlichten Marktdaten zu Neuinstallationen des Bundesverband Solarwirtschaft e. V. ein (BSW, 2017).

Die Ermittlung der jährlichen Solarerträge erfolgt durch die Anwendung einer im Rahmen des IEA Solar Heating and Cooling Programme entwickelten Methodik (IEA-SHC, 2011), welche sich auf die Wärmebereitstellung des Solarkollektors bezieht und somit keine Speicherverluste erfasst. Der jährliche

⁶⁹ Die aktuellen Daten in der Zeitreihe ab 1990 sind abrufbar unter: http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html

Endenergieertrag berechnet sich demnach aus der installierten Kollektorfläche, einem verwendungsspezifischen Ertragsfaktor (Warmwasser, Kombianlage, Schwimmbadabsorber) und der jährlichen globalen Solarstrahlung in Deutschland (DWD, 2017).

Tabelle 101: Wärmebereitstellung aus Solarthermie

	2016 [GWh]
Solarthermie	7.801

Quelle: (AGEE-Stat, 2017)

5.7.2 Substitutionsfaktoren

Die in Tabelle 101 ausgewiesenen Substitutionsfaktoren für in Einzelfeuerungen eingesetztes Brennholz fußen auf einer Sonderauswertung der mehrfach von RWI/Forsa durchgeführten, repräsentativen Zusatzerhebungen zum Energieverbrauch privater Haushalte (RWI/forsa, 2011) (vgl. Kapitel 2.2.7). Demnach wird zu ca. 51 Prozent Erdgas und zu ca. 45 Prozent Heizöl verdrängt.

Die Größenordnung der Substitutionsfaktoren wird zudem bestätigt durch eine im Rahmen der wissenschaftlichen Evaluierung des Marktanzreizprogramms durchgeführten Befragung von Fördermittelempfängern (Nast, et al., 2009).

Tabelle 102: Substitutionsfaktoren der Wärmebereitstellung aus Solarthermie

	Öl [%]	Gas [%]	Steinkohle [%]	Braunkohle [%]	Fernwärme [%]	Strom [%]
Solarthermie	44,9	50,6	0,0	0,0	1,6	2,9

Quelle: Eigene Berechnungen in Anlehnung an (RWI/forsa, 2011)

Die vermiedenen Brutto-Emissionen der Wärmebereitstellung aus Solarthermie lassen sich aufbauend auf den dargestellten Substitutionsfaktoren mittels der Brutto-Nutzungsgrade (Mittelung von Kondensations- und KWK-Betrieb) (Tabelle 61) sowie den Emissionsfaktoren der Wärmeerzeugung aus konventionellen Energieträgern (Tabelle 62) berechnen.

5.7.3 Emissionsfaktoren

Die Emissionsfaktoren für solarthermische Kollektorsysteme basieren auf der Ökobilanzdatenbank GEMIS 4.94 (vgl. Kapitel 2.2.4) (IINAS, 2016). Grundlage sind die im Rahmen des BMU-Forschungsvorhabens „LCA-EE“ durch das DLR aktualisierten Sachbilanzen (Öko-Institut, 2012). Die Ergebnisse repräsentieren jeweils ein vollständiges Vakuumröhrenkollektor- bzw. Flachkollektorsystem zur Erzeugung von Warmwasser, inklusive Warmwasserspeicher und Steuerungsstation.

Als relevante Lebenszyklusphasen ist zum einen die Herstellungsphase inklusive der Gewinnung von Kupfer als wichtigster metallischer Bestandteil und zum anderen die Betriebsphase inklusive des Stromverbrauches der Kreislaufpumpe ($2 \text{ kWh}_{\text{el}}$ je $100 \text{ kWh}_{\text{th}}$) zu nennen.

Tabelle 103: Basisannahmen der verwendeten Ökobilanz-Datensätze für die Wärmebereitstellung aus Solarthermie

Technik	Th. Nutzungsgrad [%]	Eigenstrom- bedarf ⁷⁰ [%]	Erzeugungsmix ⁷¹ [%]
Flachkollektor	93	2	81,7
Vakuumröhrenkollektor	93	2	15,6
Schwimmbadabsorber	93	2	2,7

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von GEMIS 4.94 (IINAS, 2016)

Tabelle 104: Emissionsfaktoren der Wärmebereitstellung aus Solarthermie

Technik	CO ₂ - Äq.	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	SO ₂ - Äq.	SO ₂	NO _x	Staub	CO	NMVOC
	[g/kWh]				[g/kWh]		[g/kWh]			
Flachkollektor										
Vorkette	11,45	10,51	0,03	0,00	0,05	0,03	0,03	0,02	0,11	0,00
Direkte	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hilfsenergie	11,25	10,64	0,02	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00
Vakuumröhrenkollektor										
Vorkette	16,08	14,60	0,05	0,00	0,08	0,05	0,04	0,03	0,16	0,01
Direkte	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hilfsenergie	11,25	10,64	0,02	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00
Schwimmbadabsorber										
Vorkette	6,32	5,61	0,03	0,00	0,02	0,01	0,02	0,00	0,01	0,01
Direkte	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hilfsenergie	11,25	10,64	0,02	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00

Quelle: UBA auf Basis von GEMIS 4.94 (IINAS, 2016)

5.7.4 Ergebnisse der Emissionsbilanz

Die Netto-Emissionsbilanz der Wärmebereitstellung aus Solarthermie errechnet sich aus den oben angegebenen Einzelgrößen (vgl. Tabelle 104).

Im Hinblick auf die Wirkungskategorie Treibhauseffekt vermeidet die solarthermische Wärmebereitstellung ca. 2,1 Mio. t CO₂-Äq. Treibhausgasemissionen. Der spezifische Treibhausgas-Vermeidungsfaktor liegt bei ca. 260 g CO₂-Äq. / kWh_{th}, wobei hier berücksichtigt werden muss, dass sich dieser Faktor im Unterschied beispielsweise zu Brennholz bereits auf die dem Wärmeverteilsystem unmittelbar zur Verfügung stehende Wärme bezieht.

⁷⁰ eigene Annahmen⁷¹ eigene Berechnung in Anlehnung an (BSW, 2017)

In Hinblick auf versauernd wirkende Luftschadstoffe trägt die solarthermische Wärmebereitstellung durch ihren emissionsfreien Betrieb erheblich zur Entlastung bei. Dies gilt auch für weitere Luftschadstoffe wie Kohlenmonoxid und flüchtige organische Verbindungen. Lediglich bezüglich der Staubemissionen fällt die Bilanz durch die Emissionen bei der Gewinnung der Rohstoffe und bei der Herstellung leicht negativ aus.

Tabelle 105: Emissionsbilanz der Wärmebereitstellung aus Solarthermie

	brutto vermiedene Emissionen [t]	verursachte Emissionen [t]	netto vermiedene Emissionen [t]	Netto-Vermeidungs- faktor [g/kWh]
CO₂-Äq.	2.123.717	93.854	2.029.863	260,22
CO ₂	2.032.497	85.953	1.946.544	249,54
CH ₄	3.346	290	3.056	0,39
N ₂ O	25	2	23	0,00
SO₂-Äq.	1.740	448	1.292	0,17
SO ₂	567	266	300	0,04
NO _x	1.685	261	1.425	0,18
Staub	112	138	-26	0,00
CO	1.045	912	134	0,02
NM VOC	1.685	261	1.425	0,18

Quelle: Eigene Berechnungen

5.8 Umgebungswärme: Umweltwärme⁷² und oberflächennahe Geothermie

Der Begriff Umgebungswärme⁷³ umfasst sowohl Umweltwärme als auch oberflächennahe Geothermie (die im oberflächennahen Erdreich bis zu einer Tiefe von 400 Metern gespeicherte Wärme, auch ‚geothermische Umgebungswärme‘) und somit sämtliche mit Wärmepumpen genutzte erneuerbare Wärme (Abwärme ist ausgenommen). Unter Umweltwärme wird die in bodennahen Luftschichten (‚aerothermische Umweltwärme‘) und in Oberflächengewässern (‚hydrothermische Umweltwärme‘⁷⁴) entnommene und technisch nutzbar gemachte Wärme zusammengefasst.

Im Grundwasser gespeicherte Wärme ist Teil der oberflächennahen Geothermie. Die bis zu einem Temperaturniveau von ca. 25°C vorhandene Wärme wird mittels Wärmepumpen zur Beheizung / Kühlung und Warmwasserversorgung genutzt und hat in den letzten Jahren speziell im Rahmen des Gebäudeneubaus an Bedeutung gewonnen.

Es wurden zunehmend Luft-Wärmepumpen installiert, die wegen saisonal niedriger Außentemperaturen jedoch im Vergleich der Wärmepumpensysteme untereinander die geringste Effizienz aufweisen. Erdgekoppelte Wärmepumpen (Sole-Wasser) können dagegen Jahresarbeitszahlen von über 4 erreichen. Das heißt, dass durch den Einsatz einer Einheit Strom weitere drei Einheiten Wärme erschlossen werden können, um insgesamt vier Einheiten Wärme bereitzustellen.

⁷² durch Wärmepumpen nutzbar gemachte erneuerbare Wärme (Luft/Wasser-, Wasser/Wasser- und Sole/Wasser-Wärmepumpen sowie Brauchwasser- und Gas-Wärmepumpen)

⁷³ Abweichend von der vorliegenden Definition wird „Umgebungswärme“ vielfach mit Umweltwärme gleichgesetzt.

⁷⁴ ‚hydrothermische Umweltwärme‘ bezeichnet nur die Wärmeenergie aus Oberflächenwasser, NICHT die des Grundwassers. Die Wärmeenergie des Grundwassers fällt unter den Begriff Geothermie.

5.8.1 Endenergiebereitstellung

Die Angabe zur Wärmebereitstellung aus Umweltwärme und oberflächennaher Geothermie wird von der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) übernommen (siehe Kapitel 2.2.1). Der in Tabelle 105 angegebene Datenstand entspricht der BMWi-Publikation „Erneuerbare Energie in Zahlen - Nationale und internationale Entwicklung (BMWi, 2017), die jährlich im September/Oktober publiziert wird. Zusätzlich erfolgt zum Jahresende sowie zum Februar/März eine Datenaktualisierung.⁷⁵

Die Angaben beziehen sich auf die an das zentrale Verteilsystem inkl. Pufferspeicher gelieferte, durch Wärmepumpen nutzbar gemachte erneuerbare Wärme. Dies ist nicht identisch mit der gesamten Heizwärme, da in Übereinstimmung mit der EU-Richtlinie zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (Richtlinie 2009/28/EG) der nicht-erneuerbare Anteil der Heizwärme, der unmittelbar auf den Einsatz von Strom oder Gas zur Wärmeerzeugung zurückgeht, an dieser Stelle nicht ausgewiesen wird.

Die konkrete Berechnung der durch Wärmepumpen nutzbar gemachten erneuerbaren Energie beruht auf einem Fachgutachten des Geothermiezentrums Bochum im Auftrag der AGEE-Stat (GZB, 2014). Das erarbeitete, nach Inbetriebnahmejahr, Wärmequelle, Leistung und Volllaststunden differenzierte Mengengerüst des Wärmepumpenbestandes in Deutschland wird durch die AGEE-Stat jährlich fortgeschrieben. Grundlage hierfür sind u. a. die vom Bundesverband Wärmepumpe veröffentlichten Absatzzahlen (BWP, 2017).

Technologiespezifisch stellt sich der im Folgenden zusammengefasst dargestellte Wärmepumpen-Mix wie folgt dar: die insgesamt durch Wärmepumpen bereitgestellte Heizwärmemenge wurde im Jahr 2014 mit Elektrowärmepumpen zu 46 % durch Luft/Wasser-, zu 39 % durch Sole/Wasser-, zu 10 % durch Wasser/Wasser- und zu 3 % durch Brauchwasser-Wärmepumpen und zu 2 % durch Gaswärmepumpen (bei Gas-WP nach Energiequellen nicht weiter differenziert) erzeugt (GZB, 2014).

Tabelle 106: Wärmebereitstellung aus Wärmepumpen

	2016 [GWh]
Wärmepumpen-Mix	11.305

Quelle: (AGEE-Stat, 2017)

5.8.2 Substitutionsfaktoren

Die in Tabelle 106 ausgewiesenen Substitutionsfaktoren für die durch Wärmepumpen nutzbar gemachte Wärme fußen auf einer Sonderauswertung der seit mehreren Jahren von RWI/Forsa durchgeführten, repräsentativen Zusatzerhebungen zum Energieverbrauch privater Haushalte (RWI/forsa, 2011) (vgl. Kapitel 2.2.7). Demnach wird v. a. Erdgas und Heizöl zu etwa gleichen Teilen verdrängt.

Tabelle 107: Substitutionsfaktoren der Wärmebereitstellung mittels Wärmepumpen

	Öl [%]	Gas [%]	Steinkohle [%]	Braunkohle [%]	Fernwärme [%]	Strom [%]
Wärmepumpen-Mix	42,9	47,7	0,5	1,4	4,4	3,2

⁷⁵ Die aktuellen Daten in der Zeitreihe ab 1990 sind abrufbar unter: http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html

Quelle: Eigene Berechnungen in Anlehnung an (RWI/forsa, 2011)

Die vermiedenen Brutto-Emissionen der Wärmebereitstellung aus Wärmepumpen lassen sich aufbauend auf den dargestellten Substitutionsfaktoren mittels der Brutto-Nutzungsgrade (Mittelung von Kondensations- und KWK-Betrieb) (Tabelle 61) sowie den Emissionsfaktoren der Stromerzeugung aus konventionellen Energieträgern (Tabelle 62) berechnen.

5.8.3 Emissionsfaktoren

Die Herstellungsphase der Wärmepumpen inklusive der zugehörigen Systemkomponenten ist bei einer ökobilanziellen Betrachtung des Lebenszyklus gegenüber der Betriebsphase vernachlässigbar. Aus diesem Grund werden die Emissionsfaktoren über den Hilfsenergieeinsatz (durchschnittlicher Strommix bzw. Erdgas) bestimmt, welcher anteilig durch die jeweilige technologiespezifische durchschnittliche Jahresarbeitszahl des Wärmepumpenbestandes dividiert wird (in 2014 für elektrische Luft/Wasser-WP 2,9, Sole/Wasser-WP 3,3, Wasser/Wasser-WP 3,2, Brauchwasser-WP 2,5 und Gaswärmepumpen 1,4; vgl. (GZB, 2014)). Tabelle 107 gibt die Antriebsenergie (Strom oder Gas) an, die die Wärmepumpe zur Wärmebereitstellung aus Umgebungswärme verschiedener Quellen benötigt, als auch den prozentualen Anteil der Technik am ermittelten Erzeugungsmix.

Tabelle 108: Basisannahmen der verwendeten Ökobilanz-Datensätze für Wärmepumpen

Technik	Bedarf Antriebsenergie ⁷⁶ [%]	Erzeugungsmix ⁷⁷ [%]
Elektro-WP– aerothermisch (Luft / Wasser)	32	49,94
Elektro-WP– aerothermisch (Abluft / Wasser)	40	2,2
Elektro-WP- aerothermisch (Brauchwasser)	40	0,0
Erdgas-WP alle Wärmequellen	2	1,3
Elektro-WP – geothermisch (oberflächennahe Geothermie)	26	37,6
Elektro-WP - hydrothermisch	26	9,0

Quelle: Eigene Annahmen auf der Basis von (GZB, 2014)

Die Ableitung des durchschnittlichen Emissionsfaktors zum Strommix beruht auf einer Auswertung des Nationalen Emissionsinventars (UBA, 2017c)(vgl. Kapitel 2.2.2). Dieser wird ergänzt durch die Vorkettenemissionen der zur Stromerzeugung eingesetzten Primärenergieträger auf Basis von GEMIS 4.94 (IINAS, 2016).

Eine weitere Quelle für treibhausgasrelevante Emissionen kann Leckage von teilfluorierten Arbeitsmitteln sein. Mangels belastbarer Daten und aufgrund gewählter Systemgrenzen (vgl. Kapitel 2.1.3) werden Leckagen an dieser Stelle nicht berücksichtigt. Die nach direkten Emissionen, Emissionen aus

⁷⁶ eigene Berechnung auf Basis (GZB, 2014)

⁷⁷ eigene Berechnung auf Basis (GZB, 2014) und (BWP, 2017)

den Vorketten und Emissionen aus fremdbezogener Hilfsenergie aufgeschlüsselten Emissionsfaktoren für die Wärmebereitstellung mittels Wärmepumpen sind in Tabelle 108 aufgeführt.

Tabelle 109: Emissionsfaktoren der Wärmebereitstellung mittels Wärmepumpen

Technik	CO ₂ - Äq.	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	SO ₂ - Äq.	SO ₂	NO _x	Staub	CO	NMVOC
	[g/kWh]				[g/kWh]				[g/kWh]	
Elektro-WP, Umgebungswärme – aerothermisch										
Vorkette	14,88	13,83	0,04	0,00	0,04	0,02	0,03	0,01	0,15	0,00
Direkte	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hilfsenergie Luft	193,59	183,10	0,32	0,01	0,23	0,11	0,17	0,01	0,11	0,01
Hilfsenergie Abluft	241,99	228,88	0,40	0,01	0,28	0,13	0,22	0,01	0,14	0,01
Hilfsenergie Brauchw.	241,99	228,88	0,40	0,01	0,28	0,13	0,22	0,01	0,14	0,01
Erdgas-WP										
Vorkette	42,64	24,64	0,71	0,00	0,08	0,01	0,11	0,00	0,10	0,03
Direkte	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hilfsenergie	12,10	11,44	0,02	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00
Elektro-WP, Umgebungswärme - geothermisch										
Vorkette	32,10	30,36	0,06	0,00	0,09	0,03	0,08	0,02	0,19	0,01
Direkte	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hilfsenergie	157,29	148,77	0,26	0,01	0,18	0,09	0,14	0,01	0,09	0,01
Elektro-WP, Umgebungswärme - hydrothermisch										
Vorkette	42,64	40,00	0,09	0,00	0,14	0,06	0,12	0,03	0,29	0,01
Direkte	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hilfsenergie	157,29	148,77	0,26	0,01	0,18	0,09	0,14	0,01	0,09	0,01

Quelle: Eigene Berechnung auf Basis (UBA, 2017), (GZB, 2014), (UBA, 2017c), GEMIS 4.94 (IINAS, 2016)

5.8.4 Ergebnisse der Emissionsbilanz

Die Netto-Emissionsbilanz der durch Wärmepumpen nutzbar gemachten erneuerbaren Umgebungswärme errechnet sich aus den oben angegebenen Einzelgrößen (vgl. Tabelle 109).

In der Wirkungskategorie Treibhauseffekt werden knapp 0,9 Mio. t CO₂-Äq. Treibhausgasemissionen durch oberflächennahe Geothermie und Umgebungswärme vermieden. Der spezifische Treibhausgas-Vermeidungsfaktor liegt bei ca. 86 g CO₂-Äq. / kWh_{th}, wobei hier berücksichtigt werden muss, dass sich dieser Faktor im Unterschied zu beispielsweise Brennholz bereits auf die dem Wärmeverteilungssystem unmittelbar zur Verfügung stehenden Wärme bezieht.

Zur Entlastung versauernd wirkender Luftschadstoffe trägt die Nutzbarmachung erneuerbarer Wärme mittels Wärmepumpen bei. Keine Entlastung gibt es für flüchtige organische Verbindungen, Stickoxide und Staub; dies gilt vor allem auch für Schwefeloxide und Kohlenmonoxid. In Tabelle 109 und Tabelle

110 sind jeweils die Ergebnisse der Emissionsbilanzierung bei der Wärmebereitstellung aus Umgebungswärme (unter Berücksichtigung von aerothermischen, hydrothermischen und Erdgas-Wärmepumpen) und oberflächennaher Geothermie dargestellt.

Tabelle 110: Emissionsbilanz der erneuerbaren Wärmebereitstellung aus Umgebungswärme (Wärmepumpe – aerothermisch, Erdgas-Wärmepumpe)

	brutto vermiedene Emissionen [t]	verursachte Emissionen [t]	netto vermiedene Emissionen [t]	Netto-Vermeidungs- faktor [g/kWh]
CO₂-Äq.	1.799.404	1.249.425	549.978	91,07
CO ₂	1.718.233	1.178.090	540.143	89,44
CH ₄	2.943	2.257	686	0,11
N ₂ O	25	50	-25	0,00
SO₂-Äq.	1.580	1.589	-9	0,00
SO ₂	565	727	-162	-0,03
NO _x	1.459	1.239	219	0,04
Staub	142	120	22	0,00
CO	1.629	1.559	70	0,01
NMVOG	1.459	1.239	219	0,04

Quelle: Eigene Berechnungen

Tabelle 111: Emissionsbilanz der erneuerbaren Wärmebereitstellung aus oberflächennaher Geothermie (Wärmepumpe - geothermisch)

	brutto vermiedene Emissionen [t]	verursachte Emissionen [t]	netto vermiedene Emissionen [t]	Netto-Vermei- dungsfaktor [g/kWh]
CO₂-Äq.	1.267.317	805.582	461.736	108,55
CO ₂	1.210.149	761.924	448.225	105,38
CH ₄	2.073	1.371	702	0,16
N ₂ O	18	31	-14	0,00
SO₂-Äq.	1.113	1.170	-57	-0,01
SO ₂	398	513	-115	-0,03
NO _x	1.027	944	83	0,02
Staub	100	111	-11	0,00
CO	1.147	1.176	-29	-0,01
NMVOG	211	53	158	0,04

Quelle: Eigene Berechnungen

Tabelle 112: Emissionsbilanz der erneuerbaren Wärmebereitstellung aus oberflächennaher Geothermie (Wärmepumpe - hydrothermisch)

	brutto vermiedene Emissionen [t]	verursachte Emissionen [t]	netto vermiedene Emissionen [t]	Netto-Vermeidungs- faktor [g/kWh]
CO₂-Äq.	301.492	202.309	99.183	98,02
CO ₂	287.892	191.014	96.878	95,74
CH ₄	493	359	134	0,13
N ₂ O	4	8	-4	0,00
SO₂-Äq.	265	327	-62	-0,06
SO ₂	95	146	-51	-0,05
NO _x	244	260	-16	-0,02
Staub	24	35	-12	-0,01
CO	273	383	-111	-0,11
NMVOG	50	13	37	0,04

Quelle: Eigene Berechnungen

5.9 Tiefengeothermie

Im Vergleich zur Stromerzeugung (vgl. Kapitel 4.5) sind zur Wärmebereitstellung aus Tiefengeothermie andere Bedingungen an Temperatur und Fördervolumen des Thermalwassers zu stellen. Generell benötigen geothermische Heizwerke deutlich geringeren Bohrtiefen und sind auf Grund ihrer anderen Charakteristik separat zu betrachten (vgl. Tabelle 112).

Laut Angaben des tiefengeothermischen Informationssystems (GeoTIS) waren im Jahr 2015 22 geothermische Heizwerke bzw. Heizkraftwerke mit Haupt- bzw. Nebennutzung Fernwärme in Betrieb. Dies entspricht einer geothermischen Leistung von ca. 285 MW_{th} (Agemar, Weber, & Schulz, 2014).

5.9.1 Endenergiebereitstellung

Die Angabe zur Wärmebereitstellung aus Tiefengeothermie wird von der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) übernommen (siehe Kapitel 2.2.1). Der in Tabelle 110 angegebene Datenstand entspricht der BMWi-Publikation „Erneuerbare Energie in Zahlen - Nationale und internationale Entwicklung (BMWi, 2017), die jährlich im September/Oktober publiziert wird. Zusätzlich erfolgt zum Jahresende sowie zum Februar/März eine Datenaktualisierung.⁷⁸

Tabelle 113: Wärmebereitstellung aus Tiefengeothermie

	2016 [GWh]
Tiefengeothermie	1044

Quelle: (AGEE-Stat, 2017)

⁷⁸ Die aktuellen Daten in der Zeitreihe ab 1990 sind abrufbar unter: http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html

Die Angaben zur Wärmebereitstellung beruhen auf einer Berechnung des Geothermischen Informationssystems (GeoTIS) zur Direktwärmenutzung aus geothermischen Heizwerken und Heizkraftwerken in Deutschland (Agemar, Weber, & Schulz, 2014). GeoTIS wird vom Leibniz-Institut für angewandte Geophysik betrieben und in enger Zusammenarbeit mit den geologischen Landesämtern fortlaufend aktualisiert.

5.9.2 Substitutionsfaktoren

Hinsichtlich der Substitutionsbeziehungen der Wärmebereitstellung aus Tiefengeothermie wird angenommen, dass zu 100 % mit fossilen Energieträgern erzeugte Fernwärme ersetzt wird (vgl. Tabelle 111). Dabei wird davon ausgegangen, dass die mit der Bereitstellung von fossiler bzw. tiefengeothermischer Fernwärme verbundenen Netzverluste die gleiche Größenordnung aufweisen und an dieser Stelle nicht weiter berücksichtigt werden.

Tabelle 114: Substitutionsfaktoren der Wärmebereitstellung aus Tiefengeothermie

	Öl [%]	Gas [%]	Steinkohle [%]	Braunkohle [%]	Fernwärme [%]	Strom [%]
Tiefengeothermie	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0

Quelle: Eigene Setzung

Die vermiedenen Brutto-Emissionen der Wärmebereitstellung aus Tiefengeothermie lassen sich aufbauend auf den dargestellten Substitutionsfaktoren mittels der Brutto-Nutzungsgrade (Mittelung von Kondensations- und KWK-Betrieb) (Tabelle 61) sowie die Emissionsfaktoren der Wärmeerzeugung aus konventionellen Energieträgern (Tabelle 62) berechnen.

5.9.3 Emissionsfaktoren

Aktuelle Emissionsfaktoren der geothermischen Wärmebereitstellung wurden zuletzt durch das (Öko-Institut, 2012) auf Basis einer umfassenden Sachbilanz des Internationalen Geothermiezentrums Bochum (GZB, 2012) berechnet.

Da sich der überwiegende Teil der geothermischen Heizwerke im Süddeutschen Molassebecken befindet, wird für die folgenden Betrachtungen ein auf bayerischen Mittelwerten beruhendes hydrothermales Heizwerk mit einer Thermalwassertemperatur von ca. 85 °C zugrunde gelegt. Dies korrespondiert z. B. mit einer thermischen Leistung von ca. 9,1 MW_{th}. Diese und weitere relevante Parameter sind in Tabelle 112 aufgeführt und in (GZB, 2012) dokumentiert.

Tabelle 115: Basisannahmen des verwendeten Ökobilanz-Datensatzes für die Wärmebereitstellung aus Tiefengeothermie

Parameter		Süddeutsches Molassebecken
mittlere Außentemperatur	[°C]	6,8
Vor- und Rücklauf Temperatur Thermalwasser	[°C]	85 / 55
Massenstrom Thermalwasser	[kg / s]	76
Tiefe	[m]	2.072
technische Lebensdauer	[a]	30
Volllaststunden	[h / a]	3.000
installierte Wärmeleistung	[kW _{th}]	9.143

Quelle: (GZB, 2012)

Während sich die spezifischen Aufwendungen in der Errichtungsphase je Meter Bohrtiefe nicht wesentlich von denjenigen bei der Stromerzeugung aus Tiefengeothermie unterscheiden (vgl. hierzu Kapitel 4.5), fällt der Stromeigenverbrauch bei den geothermischen Heizwerken deutlich geringer aus, weil auf einen Binärkreislauf zur Stromerzeugung und eine Kühlung verzichtet werden kann. Lediglich der Energieverbrauch der Förderpumpe ist daher zu berücksichtigen (hier mit 6 % bezogen auf die Wärme (GZB, 2012)). Die nach direkten Emissionen, Emissionen aus den Vorketten und Emissionen aus fremdbezogener Hilfsenergie aufgeschlüsselten Emissionsfaktoren für die Wärmebereitstellung aus Tiefengeothermie sind in Tabelle 113 aufgeführt. Der Betrieb geothermischer Heizwerke selbst ist emissionsfrei, sodass direkte Emissionen nicht zu berücksichtigen sind.

Tabelle 116: Emissionsfaktoren der Wärmebereitstellung aus Wärmepumpen

Technik	CO ₂ -Äq.	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	SO ₂ -Äq.	SO ₂	NO _x	Staub	CO	NMVOC
	[g/kWh]				[g/kWh]					
Umweltwärme - hydrothermisch										
Vorkette	0,73	0,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
Direkte	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hilfsenergie	36,30	34,33	0,06	0,00	0,04	0,02	0,03	0,00	0,02	0,00

Quelle: GEMIS 4.94 (IINAS, 2016), (Öko-Institut, 2012), (GZB, 2012)

5.9.4 Ergebnisse der Emissionsbilanz

Die Netto-Emissionsbilanz der Wärmebereitstellung aus Tiefengeothermie errechnet sich aus den oben angegebenen Einzelgrößen (vgl. Tabelle 114).

In Hinblick auf die Wirkungskategorie Treibhauseffekt werden 341.886 t CO₂-Äq. Treibhausgasemissionen vermieden. Der spezifische Treibhausgas-Vermeidungsfaktor liegt bei 327 g CO₂-Äq. / kWh_{th}, wobei hier berücksichtigt werden muss, dass sich dieser Faktor im Unterschied beispielsweise zu Brennholz bereits auf die dem Wärmeverteilsystem (inkl. Speicher) unmittelbar zur Verfügung stehende Wärme bezieht.

In Hinblick auf versauernd wirkende Luftschadstoffe trägt die Nutzbarmachung erneuerbarer Wärme aus Tiefengeothermie erheblich zur Entlastung bei. Dies gilt auch für weitere Luftschadstoffe wie Staub, Kohlenmonoxid und flüchtige organische Verbindungen.

Tabelle 117: Emissionsbilanz der Wärmebereitstellung aus Tiefengeothermie

	brutto vermiedene Emissionen [t]	verursachte Emissionen [t]	netto vermiedene Emissionen [t]	Netto-Vermeidungsfaktor [g/kWh]
CO₂-Äq.	341.886	757	341.129	326,87
CO₂	310.228	702	309.526	296,59
CH₄	1.171	2	1.170	1,12
N₂O	8	0	8	0,01
SO₂-Äq.	490	2	488	0,47
SO₂	236	1	236	0,23
NO_x	364	2	363	0,35
Staub	82	1	81	0,08

	brutto vermiedene Emissionen [t]	verursachte Emissionen [t]	netto vermiedene Emissionen [t]	Netto-Vermeidungs- faktor [g/kWh]
CO	218	8	210	0,20
NMVO	364	2	363	0,35

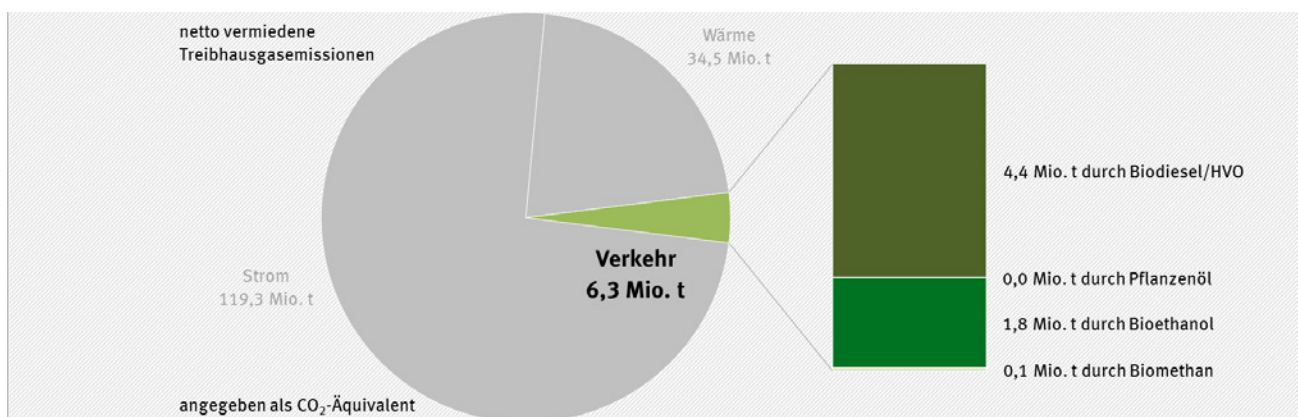
Quelle: Eigene Berechnungen

6 Erneuerbare Energien im Verkehrssektor

Die Erneuerbare-Energien-Nutzung im Verkehrssektor wird mit einem Anteil von etwa 90 Prozent an der Gesamtnutzung wesentlich durch den Einsatz von Biokraftstoffen geprägt. Der Beitrag des erneuerbaren Stroms beläuft sich auf circa 10 Prozent. Die Anteile weiterer erneuerbarer Energieträger zum Kraftstoffsektor (z. B. synthetische Kraftstoffe) sind aufgrund der sehr geringen Einsatzmengen noch nicht in der Energiestatistik erfasst und werden daher in der Emissionsbilanz gleichfalls nicht berücksichtigt. Da der erneuerbare Stromverbrauch im Verkehrssektor bereits Bestandteil der Bilanzierung im Stromsektor ist, werden an dieser Stelle somit ausschließlich flüssige Biokraftstoffe und Biomethan betrachtet.

Durch die Bereitstellung von Biokraftstoffen im Verkehrssektor wurden im Jahr 2016 Treibhausgasemissionen in Höhe von insgesamt 6,3 Mio. t CO₂-Äq. vermieden. Von den drei untersuchten Sektoren (Strom, Wärme und Verkehr) trug der Verbrauch von Biokraftstoffen damit etwa 3 % zur Netto-Gesamtemissionsvermeidung an Treibhausgasen bei. Die größten THG-Vermeidungen wurden durch den Einsatz von Biodiesel bzw. Hydrogenated Vegetable Oils (HVO) (4,4 Mio. t CO₂-Äq.) und Bioethanol (1,8 Mio. t CO₂-Äq.) erreicht. Der Einsatz von Pflanzenöl und Biomethan hatte aufgrund der sehr geringen Einsatzmengen nur einen marginalen Effekt (siehe Abbildung 15).

Abbildung 15: Anteil des EE-Verbrauchs im Verkehrssektor an den netto vermiedenen THG-Gesamtemissionen durch die Nutzung erneuerbarer Energien*



*keine Berücksichtigung von indirekten Landnutzungsänderungen, vgl. Kapitel 2.1.3

Quelle: Eigene Darstellung

Um die Einzelheiten der Emissionsbilanz des Biokraftstoffverbrauchs in Deutschland abbilden zu können, ist es essentiell die Art und Herkunft der Rohstoffe zur Biokraftstoffherstellung mit einzubeziehen. Die direkten und indirekten Landnutzungsänderungen werden an dieser Stelle nicht berücksichtigt (vgl. Kapitel 2.1.3).

In den folgenden Abschnitten wird nacheinander die Emissionsbilanz der Bio-kraftstoffe Biodiesel, Bioethanol, Pflanzenöl und Biomethan im Detail erläutert. Diese Unterkapitel sind dabei stets gleich aufgebaut: Nach einer kurzen Einleitung werden die jeweils spezifischen Eingangsparameter des Endenergieverbrauchs sowie der Substitutions- und Emissionsfaktoren erläutert (vgl. auch Kapitel 2.2) bevor die Ergebnisse der Emissionsbilanz des jeweiligen erneuerbaren Energieträgers nach der in Kapitel 2.1 erläuterten Methodik dargestellt werden.

6.1 Biodiesel und HVO⁷⁹

Biodiesel besteht aus Fettsäuremethylestern (Fatty Acid Methylester (FAME)), die durch Umsteuerung aus Pflanzenölen hergestellt werden. Die Qualitätsanforderungen an Biodiesel sind in der DIN EN 14214 festgelegt. Hydrierte Pflanzenöle (von Hydrogenated Vegetable Oils abgeleitet, auch HVO genannt) sind Gemische reiner Kohlenwasserstoffe, die aus den Fettsäureketten der Pflanzenöle hergestellt werden. Pflanzenöl wird dabei mittels katalytischer Reaktion unter Zugabe von Wasserstoff (Hydrierung) in Kohlenwasserstoffe umgewandelt.

6.1.1.1 Endenergiebereitstellung

Die Angabe zur Bereitstellung von Biodiesel/HVO wird von der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) übernommen (vgl. Kapitel 2.2.1). Der in Tabelle 115 angegebene Datenstand entspricht der BMWi-Publikation „Erneuerbare Energien in Zahlen - Nationale und internationale Entwicklung“ (BMWi, 2017), die jährlich im August/September veröffentlicht wird. Zusätzlich erfolgt zum Jahresende sowie zum Februar/März eine Datenaktualisierung.⁸⁰

Die Daten beruhen auf den Angaben zum Absatz der Mineralölstatistik des Bundesamts für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA).

Analog zum Vorgehen der AGEB wird der in den Bereichen Landwirtschaft, Militär und Baugewerbe eingesetzte Biodiesel nicht dem Verkehrssektor zugeordnet, sondern im Wärmesektor unter flüssiger Biomasse verbucht (vgl. Kapitel 5.4).

Biodiesel wird in Deutschland i. d. R. mineralischem Diesel beigemischt. Die Verwendung als Reinkraftstoff spielt kaum eine Rolle. HVO wird ausschließlich im Zuge von Beimischungen genutzt.

Tabelle 118: Verbrauch von Biodiesel und HVO im Verkehrssektor

	2016 [GWh]
Biodiesel/HVO (u. a. ohne Landwirtschaft)	20.873

Quelle: (AGEE-Stat, 2017)

6.1.1.2 Substitutionsfaktoren

Der Berechnung der Substitutionsbeziehung zwischen mineralischem Diesel und Biodiesel und HVO liegt die Annahme zugrunde, dass eine kWh Biodiesel/HVO genau eine kWh mineralisches Dieselöl ersetzt. Dieses Verhältnis begründet sich damit, dass beide Kraftstoffe ein weitgehend gleiches Motorverhalten aufweisen (Gohlisch, 2013) und in der Regel als Mischkraftstoffe verwendet werden.

6.1.1.3 Emissionsfaktoren

Im Jahr 2015 fußte der überwiegende Teil des verwendeten Biodiesels auf Rapsöl, gefolgt von biogenen Abfällen. Biodiesel aus Palm- und Sojaöl sowie Sonnenblumen spielt dagegen nur eine relativ geringe Rolle. HVO wurde im Wesentlichen auf Palmölbasis hergestellt (vgl. Tabelle 116) (BLE, 2016). Da die Werte für das Jahr 2016 zum Zeitpunkt der Bearbeitung noch nicht vorlagen, erfolgten die Berechnungen auf Basis der Werte für das Jahr 2015.

⁷⁹ Hydrogenated Vegetable Oils

⁸⁰ Die aktuellen Daten in der Zeitreihe ab 1990 sind abrufbar unter: http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html

Tabelle 119: Rohstoffbasis des genutzten Biodiesels/HVOs

	Raps [%]	Soja ⁸¹ [%]	Palmöl [%]	Abfall/Reststoff [%]
Biodiesel	65,3	0,4	6,5	27,8
HVO	0,0	0,0	96,9	3,1
Biodiesel/HVO-Mix	59,4	0,4	14,7	25,6

Quelle: Eigene Berechnung auf Basis (BLE, 2016)

Der UBA-Emissionsberechnung für Biodiesel/HVO (für das Jahr 2016) liegen neben der schon bislang berücksichtigten Rohstoffbasis (erstmalig), die im Zuge der THG-Quote (Gesetz zur Änderung der Förderung von Biokraftstoffen, 2009) von den Wirtschaftsakteuren selbst bilanzierten bzw. angesetzten THG-Emissionen, wie sie die BLE im Zuge ihres jährlichen Evaluations- und Erfahrungsberichts zur Biokraftstoff-/Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung (BLE, 2016) veröffentlicht, zugrunde. Die Emissionen der einzelnen Treibhausgase und Luftschadstoffe wurden dann vom UBA überschlägig auf Basis der publizierten Gesamt-THG-Emissionen unter Einbeziehung der Erkenntnisse des Forschungsvorhabens „BioEm“ (IFEU, 2016) und anderer Expertisen (IFEU, 2011) sowie verschiedener Annahmen und Analogieschlüsse abgeleitet. Da Informationen zu der Vielzahl der über alle Rohstoffe, Transport- und Herstellungswegen einfließenden Teilmengen nicht oder nur ansatzweise bekannt sind, ist die Verfahrensweise mit größeren Unsicherheiten behaftet. Die nach Rohstoff untergliederten Datensätze umfassen die Emissionen der gesamten Vorkette sowie direkte Emissionen. Die Emissionsfaktoren von abfallbasiertem Biodiesel sind signifikant niedriger als die der anderen Rohstoffpfade, da die Vorketten dieser Einsatzstoffe bis zur Sammlung mit Null angesetzt werden. Tabelle 117 gibt einen Überblick über die Emissionsfaktoren der Biodiesel- und HVO-Verwendung, differenziert nach der Rohstoffbasis.

Tabelle 120: Biodiesel- und HVO-Emissionsfaktoren differenziert nach Rohstoffbasis*

Biodiesel/ HVO	CO ₂ - Äq.	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	SO ₂ -Äq.	SO ₂	NO _x	Staub	CO	NMV OC
	[g/kWh]				[g/kWh]			[g/kWh]		
Raps										
Vorkette	114,86	72,96	0,15	0,13	0,23	0,06	0,24	0,02	0,07	0,02
Direkte	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,10	0,09	0,01	0,04	0,04
Soja										
Vorkette	127,47	77,78	0,13	0,16	1,29	0,62	0,96	0,07	0,13	0,03
Direkte	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,10	0,09	0,01	0,04	0,04
Palmöl										
Vorkette	88,20	53,46	0,22	0,10	0,81	0,37	0,64	0,07	0,08	0,02
Direkte	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,10	0,09	0,01	0,04	0,04
Abfall, Reststoff										
Vorkette	27,18	24,90	0,08	0,00	0,11	0,06	0,07	0,01	0,02	0,00

⁸¹ inkl. Sonnenblumen

Biodiesel/ HVO	CO ₂ - Äq.	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	SO ₂ -Äq.	SO ₂	NO _x	Staub	CO	NMV OC	
	[g/kWh]				[g/kWh]						[g/kWh]
Direkte	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,10	0,09	0,01	0,04	0,04	
HVO	Vorkette	115,35	71,03	0,61	0,10	0,83	0,37	0,67	0,08	0,10	0,03
	Direkte	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,10	0,09	0,01	0,04	0,04

* keine Berücksichtigung von indirekten Landnutzungsänderungen, vgl. Kapitel 2.1.3

Quelle: UBA auf Basis von BLE (BLE, 2016) und ZSE (UBA, 2017)

Insgesamt liegen die Werte, die im Rahmen der THG-Quote (Gesetz zur Änderung der Förderung von Biokraftstoffen, 2009) bilanziert und von der der BLE veröffentlicht sowie anschließend vom UBA als Grundlage für die Emissionsbilanzierung herangezogen werden, deutlich unter denen der Ökobilanzdatenbanken (IINAS, 2016; ecoinvent, 2017) und wissenschaftlichen Veröffentlichungen (IFEU, 2016; Braune, et al., 2016; DBFZ, 2015a; JRC, 2017; JRC, 2014). Ursächlich dafür sind insbesondere folgende Sachverhalte:

- ▶ Der in Deutschland zum Einsatz gelangende Biodiesel kommt aufgrund der ausschließlich hier bestehenden THG-Quote schwerpunktmäßig aus besonders energieeffizienten Anlagen, welche zum größten Teil strom- und wärmeverbrauchsreduziert sowie gleichfalls stoffstromoptimiert arbeiten. Zudem erfolgt teilweise eine emissionsreduzierende gekoppelte Bereitstellung von Strom und Prozesswärme mittels KWK. Daher sind die in Deutschland in Verkehr gebrachten Biokraftstoffe bzgl. der Höhe der Treibhausgasminde rung als nicht typisch für die in Europa eingesetzten biogenen Kraftstoffe anzusehen.
- ▶ Den durch Forschungsinstitute veröffentlichten Werten und den (typischen) Werten der RED (Richtlinie 2009/28/EG, 2009) (Richtlinie (EU) 2015/1513, 2015) sowie dem Entwurf der RED-Novelle (Europäische Kommission, 2016) liegen dagegen eher durchschnittliche und ältere Anlagen mit standardmäßiger Energieversorgung (Erdgas-Kessel bei raps- und abfall-/reststoffbasierter Biodiesel) zugrunde, welche teilweise eher theoretisch bzw. auf Basis einzelner (nicht zwangsläufig typischer) Praxisanlagen abgeleitet wurden.
- ▶ Der in den Ländern der Europäischen Union stattfindende Rapsanbau zur Biodieselherstellung wird typischerweise nicht selbst bilanziert, sondern erfolgt i. d. R. auf Basis der NUTS2-Werte gemäß EE-RL-Artikel 19, Absatz 2. Diese beruhen auf Eingangswerten der Jahre 2006-2010 und entsprechen damit nicht dem derzeitigen Stand der Wissenschaft. Zusätzlich ist anzumerken, dass diese die N₂O-Feldemissionen aufgrund des seinerzeit zugrunde gelegten und von der Europäischen Kommission im Zuge von RED II auch nicht mehr verfolgten DNDC-Modells⁸² (die dort veröffentlichten Werte basieren auf dem GNOC-Modell⁸³) tendenziell unterschätzen. Wenigstens bei den deutschen NUTS2-Werten sind zusätzlich die zu gering veranschlagten Stickstoffdüngereinsätze zu nennen. Generell muss an dieser Stelle angemerkt werden, dass die jeweiligen Länderberichte zu den oben genannten NUTS2-Gebieten bzgl. der Eingangswerte sowie der Berechnungsmethodik bei den N₂O-Emissionen vielfach intransparent sind. Aktualisiert, bilanziert bzw. berechnet sollten die THG-Emissionen des beim Biodiesel im Fokus stehenden Rapsanbaus vermutlich etwas höher liegen als bei

⁸² DeNitrification DeComposition: siehe hierzu bei Leip et al. (2008)

⁸³ European Commission, Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport: The Global Nitrous Oxide Calculator – GNOC – Online Manual Tool, Version 1.2.2, <http://gnoc.jrc.ec.europa.eu>, 18. Oktober 2013

den derzeit geltenden NUTS2-Werten. Geringere Emissionen sind jedoch ebenfalls nicht auszuschließen, falls sich beispielsweise die im Zuge eines aktuell abgeschlossenen Forschungsvorhabens (Flessa, et al., 2017) für fünf Praxisstandorte gewonnenen Erkenntnisse zu den N₂O-Emissionen als typisch für den Rapsanbau in Deutschland und Europa herausstellen sollten.

- ▶ Bislang wurde von den deutschen und wahrscheinlich auch europäischen Biodieselproduzenten nur die Bereitstellung des zur Veresterung des Pflanzenöls benötigten Methanols, welches i. d. R. fossilen Ursprungs ist, bilanziert, was jedoch nicht sachgerecht ist, da aus der Verbrennung des Methanolanteils im Biodiesel fossile CO₂-Emissionen resultieren. Da jedoch unterstellt wird, dass die Verwendung von Biokraftstoffen THG-neutral ist, müssten die methanolbedingten CO₂-Verbrennungsemissionen gleichfalls Bestandteil der Biodieselbereitstellung werden. Die EU-Kommission hat dieses Problem erkannt (Europäische Kommission, 2015) und setzt entsprechende Änderungen gegenwärtig um. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die für die hier vorgelegte Bilanzierung (des Biodieseleinsatzes 2016) verwendeten BLE-Gesamtemissionsfaktoren für das Jahr 2015 im Regelfall die deutlich zu niedrigen Emissionsfaktoren für den Methanoleinsatz beinhalten. Neu bilanziert würden die THG-Emissionen des Biodieselherstellungsprozesses um etwa 56 % und die der THG-Gesamtemissionen der Biodieselnutzung um etwa 7 % höher liegen.

Die THG-Emissionsfaktoren von fossilem Kraftstoff (vgl. Tabelle 118), welche wiederum in direkte Emissionen und Emissionen aus der Vorkette aufgeteilt sind, bilden die Grundlage zur Bestimmung der vermiedenen Emissionen, die aus dem Einsatz von Biodiesel resultieren. Um eine differenzierte Bilanzierung der einzelnen Treibhausgase und Luftschadstoffe vornehmen zu können, wurden die Emissionsfaktoren der einzelnen Treibhausgase und Luftschadstoffe mit den entsprechenden Angaben der Ökobilanzdatenbank GEMIS 4.94 ergänzt.

Fahrzeugbedingte Emissionen unterscheiden sich vor allem beim Einsatz von reinem Biodiesel gegenüber mineralischem Diesel. Diese abweichenden Emissionscharakteristika werden in der Emissionsbilanz jedoch nicht berücksichtigt, da die Nutzung von reinem Biodiesel sehr gering ist und zudem keine weitergehenden gesicherten Erkenntnisse zu den Unterschieden hinsichtlich Nutzungsgraden und Emissionen vorliegen. Für die Beimischung von Biodiesel zu mineralischem Diesel ist dagegen höchstens von einer minimalen Veränderung der Motoremissionen auszugehen. Hierzu liegen ebenfalls keine abschließenden Untersuchungsergebnisse vor (Gohlisch, 2013).

Tabelle 121: Emissionsfaktoren von mineralischem Diesel

Dieselkraftstoff	CO ₂ -Äq.	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	SO ₂ -Äq.	SO ₂	NO _x	Staub	CO	NM VOC
	[g/kWh]				[g/kWh]				[g/kWh]	
Vorkette	34,94	32,72	0,07	0,00	0,18	0,11	0,10	0,02	0,05	0,04
Direkte	266,40	266,40	0,00	0,00	0,16	0,10	0,09	0,01	0,04	0,04

Quelle: auf Grundlage Richtlinie 2009/28/EG (Anhang V) angepasst mit GEMIS 4.94 (IINAS, 2016) und ZSE (UBA, 2017)

6.1.1.4 Ergebnisse der Emissionsbilanz

Die Netto-Emissionsbilanz der Biodieselbereitstellung errechnet sich aus den oben angegebenen Einzelgrößen. Mit Blick auf die Wirkungskategorie Treibhausgaseffekt wurden durch den Einsatz von Biodiesel und HVO Treibhausgasemissionen in Höhe von ca. 4,4 Mio. t CO₂-Äq. vermieden. Der spezifische Vermeidungsfaktor beträgt knapp über 210 g CO₂-Äq. / kWh bezogen auf den Gesamteinsatz. Bei den Luftschadstoffen resultieren mit Ausnahme von NMVOC durchweg Emissionserhöhungen.

Tabelle 122: Emissionsbilanz der Biodiesel-/HVO-Nutzung

	brutto vermiedene Emissionen [t]	verursachte Emissionen [t]	netto vermiedene Emissionen [t]	Netto-Vermeidungs- faktor [g/kWh]
CO₂-Äq.	6.289.841	1.903.283	4.386.558	210,15
CO ₂	6.243.614	1.241.838	5.001.775	239,63
CH ₄	1.555	3.767	-2.212	-0,11
N ₂ O	25	1.904	-1.879	-0,09
SO₂-Äq.	7.151	9.367	-2.215	-0,11
SO ₂	4.329	4.178	150	0,01
NO _x	4.055	7.423	-3.368	-0,16
Staub	589	719	-130	-0,01
CO	1.946	2.204	-258	-0,01
NMVOG	1.788	1.282	506	0,02

Quelle: Eigene Berechnung

6.2 Bioethanol

Bioethanol ist ein Alkohol, der aus Biomasse gewonnen und in Otto-Motoren fast ausschließlich als Kraftstoffbeimischung an Stelle von Ottokraftstoff bzw. fossilen MTBE verwendet wird. Bioethanol lässt sich auf Basis unterschiedlicher Rohstoffe (Getreide, Rüben, Zuckerrohr etc.) herstellen. Die Qualitätsanforderungen an Bioethanol sind in der DIN-Norm 51625 (DIN 51625:2008-08) festgelegt.

6.2.1.1 Endenergiebereitstellung

Die Angabe zur Bereitstellung von Bioethanol wird von der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) übernommen (vgl. Kapitel 2.2.1). Der in Tabelle 120 angegebene Datenstand entspricht der BMWi-Publikation „Erneuerbare Energien in Zahlen - Nationale und internationale Entwicklung“ (BMWi, 2017), die jährlich im August/September veröffentlicht wird. Zusätzlich erfolgt zum Jahresende sowie zum Februar/März eine Datenaktualisierung⁸⁴. Die Daten beruhen auf den Angaben der Mineralölstatistik des BAFA.

Tabelle 123: Bioethanolverbrauch im Verkehrssektor

	2016 [GWh]
Bioethanol	8.663

Quelle: (AGEE-Stat, 2017)

6.2.1.2 Substitutionsfaktoren

Der Berechnung der Substitutionsbeziehung zwischen Ottokraftstoff und Bioethanol liegt die Annahme zugrunde, dass eine kWh Bioethanol eine kWh konventionellen Ottokraftstoffs ersetzt. Dieses Verhältnis begründet sich damit, dass beide Kraftstoffe (auch da fast ausschließlich als Mischung mit geringem Bioethanolanteil eingesetzt) ein weitgehend gleiches Motorverhalten aufweisen (Gohlisch, 2013).

⁸⁴ Die aktuellen Daten in der Zeitreihe ab 1990 sind abrufbar unter: http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html

6.2.1.3 Emissionsfaktoren

Weizen, Mais und Zuckerrüben stellen das Gros der pflanzlichen Rohstoffe des in Deutschland eingesetzten Bioethanol dar (vgl. Tabelle 121). Mit dem Evaluationsbericht der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE), der auf Basis des „Nachhaltige-Biomasse-Systems“ (Nabisy) und der Biokraftstoffquotenstatistik erstellt wird, stehen wichtige Informationen über die Rohstoffzusammensetzung des in Deutschland verwendeten Bioethanols zur Verfügung (vgl. Kapitel 2.2.5). Da die Werte für 2016 zum Zeitpunkt der Bearbeitung noch nicht vorlagen, erfolgten die Berechnungen auf Basis der Werte für das Jahr 2015.

Tabelle 124: Rohstoffbasis des genutzten Bioethanols

	Abfall	Mais	Weitere Getreidesorten ⁸⁵	Zuckerrüben	Zuckerrohr
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Bioethanol	0,5	33,2	50,7	13,5	2,1

Quelle: Eigene Berechnung auf Basis (BLE, 2016)

Der UBA-Emissionsberechnung für Bioethanol (für das Jahr 2016) liegen neben der schon bislang berücksichtigten Rohstoffbasis (erstmalig) die im Zuge der THG-Quote (Gesetz zur Änderung der Förderung von Biokraftstoffen, 2009) von den Wirtschaftsteilnehmern selbst bilanzierten bzw. angesetzten THG-Emissionen, wie sie die BLE im Zuge ihres jährlichen Evaluations- und Erfahrungsberichts zur Biokraftstoff-/Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung (BLE, 2016) veröffentlicht, zugrunde. Die Emissionen der einzelnen Treibhausgase und Luftschadstoffe wurden dann vom UBA überschlägig auf Basis der publizierten Gesamt-THG-Emissionen unter Einbeziehung der Erkenntnisse des Forschungsvorhabens „BioEm“ (IFEU, 2016) und anderer Expertisen (IFEU, 2011) sowie verschiedener Annahmen und Analogieschlüsse abgeleitet. Da Informationen zu der Vielzahl der über alle Rohstoffe, Transport- und Herstellungswegen einfließenden Teilmengen nicht oder nur ansatzweise bekannt sind, ist die Verfahrensweise mit größeren Unsicherheiten behaftet. In Tabelle 122 sind die Bioethanol-Emissionsfaktoren differenziert nach Rohstoffbasis dargestellt.

Tabelle 125: Bioethanol-Emissionsfaktoren differenziert nach Rohstoffbasis*

Bioethanol	CO ₂ -Äq.	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	SO ₂ -Äq.	SO ₂	NO _x	Staub	CO	NMVOC
	[g/kWh]				[g/kWh]					
Abfall										
Vorkette	52,87	50,10	0,09	0,00	0,11	0,04	0,11	0,01	0,04	0,01
Direkte	0,00	0,00	0,00	0,00	0,19	0,12	0,11	0,01	0,05	0,05
Mais										
Vorkette	82,21	70,81	0,20	0,02	0,25	0,09	0,22	0,02	0,07	0,01
Direkte	0,00	0,00	0,00	0,00	0,19	0,12	0,11	0,01	0,05	0,05
Weitere Getreidesorten⁸⁶										

⁸⁵ Hauptsächlich Weizen sowie Roggen, Gerste, Triticale etc.

⁸⁶ Hauptsächlich Weizen sowie Roggen, Gerste, Triticale etc.

Bioethanol	CO ₂ - Äq.	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	SO ₂ - Äq.	SO ₂	NO _x	Staub	CO	NM VOC
	[g/kWh]				[g/kWh]			[g/kWh]		
Vorkette	82,82	35,42	0,13	0,15	0,44	0,10	0,49	0,04	0,07	0,01
Direkte	0,00	0,00	0,00	0,00	0,19	0,12	0,11	0,01	0,05	0,05
Zuckerrüben										
Vorkette	126,85	100,59	0,20	0,07	0,35	0,07	0,40	0,03	0,12	0,02
Direkte	0,00	0,00	0,00	0,00	0,19	0,12	0,11	0,01	0,05	0,05
Zuckerrohr										
Vorkette	70,25	32,68	0,56	0,08	1,37	0,51	1,22	0,13	0,63	0,22
Direkte	0,00	0,00	0,00	0,00	0,19	0,12	0,11	0,01	0,05	0,05

* keine Berücksichtigung von indirekten Landnutzungsänderungen, vgl. Kapitel 2.1.3

Quelle: UBA auf Basis von BLE (BLE, 2016) und ZSE (UBA, 2017)

Insgesamt liegen die Werte, welche im Rahmen der THG-Quote bilanziert und von der BLE veröffentlicht sowie anschließend vom UBA als Grundlage für die Emissionsbilanzierung herangezogen werden deutlich unter denen sämtlicher Ökobilanzdatenbanken (IINAS, 2016; ecoinvent, 2017) und diesbezüglichen Veröffentlichungen (IFEU, 2016; Braune, et al., 2016; JRC, 2017; JRC, 2014; DBFZ, 2015b). Ursächlich dafür sind insbesondere folgende Sachverhalte:

- ▶ Das in Deutschland zum Einsatz gelangende Bioethanol kommt aufgrund der ausschließlich hier bestehenden THG-Quote schwerpunktmäßig aus besonders energieeffizienten Anlagen, welche zum größten Teil strom- und wärmeverbrauchsreduziert arbeiten. Zudem erfolgt nicht selten auch eine emissionsreduzierende gekoppelte Bereitstellung von Strom und Prozesswärme mittels KWK, teilweise auch auf Basis von Biomasse. Zudem sind Bioethanollieferungen nach Deutschland wahrscheinlich (besonders) häufig durch einen Bonus für die Substitution von fossilem CO₂ gekennzeichnet. Daher ist das in Deutschland in Verkehr gebrachte Bioethanol bzgl. der Höhe der Treibhausgasreduzierung keineswegs typisch für den europäischen Durchschnitt.
- ▶ Den durch Forschungsinstitute veröffentlichten Werten und den (typischen) Werten der RED (Richtlinie 2009/28/EG, 2009) (Richtlinie (EU) 2015/1513, 2015) sowie dem Entwurf der RED-Novelle (Europäische Kommission, 2016) liegen dagegen vielfach durchschnittliche und ältere Anlagen mit standardmäßiger Energieversorgung zugrunde, teilweise theoretisch bzw. auf Basis einzelner (keineswegs zwangsläufig typischer) Praxisanlagen abgeleitet.
- ▶ Die Analyse der verfügbaren Informationen zu den geringen Emissionen der Bioethanolherstellung legt nahe, dass die mit den THG-Emissionen sehr stark korrespondierenden Wärme- und Stromverbräuche einiger für den deutschen Markt produzierenden Anlagen deutlich unter denen einer „Durchschnittsanlage“ liegen müssen.
- ▶ Der in den Ländern der Europäischen Union stattfindende Substratanbau zur Bioethanolherstellung wird typischerweise nicht selbst bilanziert, sondern erfolgt i. d. R. auf Basis der NUTS2-Werte gemäß EE-RL-Artikel 19, Absatz 2. Diese beruhen auf Eingangswerten der Jahre 2006-2010 und entsprechen damit nicht mehr dem Stand der Wissenschaft. Inwieweit eine Aktualisierung der Datenbasis sowie ein Methodenwechsel für die Berechnung der Lachgasemissionen zu abweichenden Ergebnissen führen würden, lässt sich zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht abschließend einschätzen.

- Die hohe THG-Einsparung beim Bioethanol ist u. a. Ergebnis von teilweise sehr hohen CO₂-Gutschriften für die externe Verwendung des prozessbedingt entstehenden biogenen CO₂. Die diesbezüglichen Informationen der Kommission (Europäische Kommission, 2015) erscheinen jedoch nicht ausreichend für die konkrete Bilanzierungspraxis; klare Regeln zur Berechnung der Substitution fossiler CO₂-Mengen fehlen, zumal im Bereich Gewächshausdüngung auch schwierige Allokationsfestlegungen zwischen der i. d. R. parallelen Wärme- und CO₂-Bereitstellung zu treffen sind. Daher kann nicht vollständig ausgeschlossen werden, dass die veranschlagte Substitution von konventionellem CO₂ insgesamt zu hoch ausfällt.

Der THG-Emissionsfaktor von fossilem Kraftstoff (vgl. Tabelle 123) - aufgeteilt in direkte Emissionen sowie Vorkettenemissionen - bildet die Grundlage zur Bestimmung der vermiedenen Emissionen, die aus dem Einsatz von Bioethanol resultieren. Zur differenzierten Bilanzierung der einzelnen Treibhausgase und Luftschadstoffe wurden die Emissionsfaktoren der einzelnen Treibhausgase und Luftschadstoffe mit den entsprechenden Angaben der Ökobilanzdatenbank GEMIS 4.94 ergänzt.

Tabelle 126: Emissionsfaktoren von Ottokraftstoff

Ottokraftstoff	CO ₂ -Äq.	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	SO ₂ -Äq.	SO ₂	NO _x	Staub	CO	NMVOC
	[g/kWh]				[g/kWh]				[g/kWh]	
Vorkette	42,13	39,63	0,08	0,00	0,22	0,13	0,12	0,02	0,05	0,05
Direkte	259,20	259,20	0,00	0,00	0,19	0,12	0,11	0,01	0,05	0,05

Quelle: auf Grundlage Richtlinie 2009/28/EG (Anhang V) angepasst mit GEMIS 4.94 (IINAS, 2015) und ZSE (UBA, 2017)

Fahrzeugbedingte Emissionen unterscheiden sich insbesondere beim Einsatz von Kraftstoffen mit hohem Bioethanolanteil gegenüber Ottokraftstoff. Für die Beimischung von Bioethanol zu Ottokraftstoff ist jedoch höchstens von einer leichten Veränderung des fahrzeugbedingten Emissionsverhaltens auszugehen. Hierzu liegen ebenfalls keine abschließenden Untersuchungsergebnisse vor (Gohlisch, 2013).

6.2.1.4 Ergebnisse der Emissionsbilanz

Die Netto-Emissionsbilanz der Bioethanolbereitstellung errechnet sich aus den oben angegebenen Einzelgrößen. Mit Blick auf die Wirkungskategorie Treibhausgasereffekt wurden durch den Einsatz von Bioethanol Treibhausgasemissionen in Höhe von knapp 1,8 Mio. t CO₂-Äq. vermieden. Der spezifische Vermeidungsfaktor beträgt 213 g CO₂-Äq. / kWh bezogen auf den Gesamteinsatz von Bioethanol. In Hinblick auf die Luftschadstoffe ist der Einsatz von Bioethanol differenziert zu bewerten. Durch den Einsatz von Bioethanol resultieren sowohl zusätzlich Schwefeldioxid, als auch Stickoxid-, Staub- und Kohlenmonoxid-Emissionen. Lediglich für die flüchtigen organischen Verbindungen sind Reduzierungen zu verzeichnen.

Tabelle 127: Emissionsbilanz der Bioethanolnutzung

	brutto vermiedene Emissionen [t]	verursachte Emissionen [t]	netto vermiedene Emissionen [t]	Netto-Vermeidungsfaktor [g/kWh]
CO₂-Äq.	2.610.420	763.453	1.846.967	213,20
CO₂	2.588.799	484.734	2.104.064	242,88
CH₄	690	1.474	-785	-0,09
N₂O	15	812	-797	-0,09

	brutto vermiedene Emissionen [t]	verursachte Emissionen [t]	netto vermiedene Emissionen [t]	Netto-Vermeidungs- faktor [g/kWh]
SO₂-Äq.	3.558	5.016	-1.458	-0,17
SO₂	2.186	1.910	276	0,03
NO_x	1.971	4.442	-2.472	-0,29
Staub	281	413	-131	-0,02
CO	908	1.195	-287	-0,03
NMVOC	801	538	262	0,03

Quelle: Eigene Berechnung

6.3 Pflanzenöl

Pflanzenöle sind aus Ölpflanzen gewonnene Fette und fette Öle. Die Eigenschaften von Pflanzenölen zum Einsatz im Kraftstoffbereich sind in der DIN-Norm 51605 (DIN 51605:2010-09) definiert.

6.3.1.1 Endenergiebereitstellung

Die Angabe zum Verbrauch von Pflanzenöl wird von der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) übernommen (vgl. Kapitel 2.2.1). Der in Tabelle 125 angegebene Datenstand entspricht der BMWi-Publikation „Erneuerbare Energien in Zahlen - Nationale und internationale Entwicklung“ (BMWi, 2017), die jährlich im August/September veröffentlicht wird. Zusätzlich erfolgt zum Jahresende sowie zum Februar/März eine Datenaktualisierung⁸⁷.

Die Daten beruhen auf den Angaben der Mineralölstatistik des Bundesamts für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA).

Tabelle 128: Pflanzenölverbrauch

	2016 [GWh]
Pflanzenöl	42

Quelle: (AGEE-Stat, 2017)

6.3.1.2 Substitutionsfaktoren

Der Berechnung der Substitutionsbeziehung zwischen mineralischem Diesel und Pflanzenöl liegt die Annahme zugrunde, dass eine kWh Pflanzenöl eine kWh mineralischen Diesels ersetzt. Dieses Verhältnis begründet sich damit, dass beide Kraftstoffe kein stark abweichendes Motorverhalten aufweisen (Gohlisch, 2013).

6.3.1.3 Emissionsfaktoren

Der Einsatz von Pflanzenölen im Kraftstoffbereich wird aufgrund der Anforderungen der DIN-Norm (DIN 51605:2010-09) von Rapsöl dominiert, im Jahr 2015 betrug der Anteil 100% (vgl. Tabelle 126). Die Verwendung von Palmöl als Rohstoff zur Herstellung von Pflanzenöl für den Kraftstoffsektor kann insbesondere aufgrund der spezifischen Viskosität von Palmöl, die außerhalb des zulässigen Tempera-

⁸⁷ Die aktuellen Daten in der Zeitreihe ab 1990 sind abrufbar unter: http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html

turbereichs der genannten DIN-Norm liegt, weitgehend ausgeschlossen werden. Eine teilweise Beimischung von Sojaöl ist dagegen theoretisch möglich, da die festgelegten Parameter der DIN-Norm eingehalten werden.

Tabelle 129: Rohstoffbasis des genutzten Pflanzenöls

	Raps [%]	Soja [%]	Palmöl [%]
Pflanzenöl	100,0	0,0	0,0

Quelle: (BLE, 2016)

Der UBA-Emissionsberechnung für Pflanzenöl (für das Jahr 2016) liegen neben der bislang berücksichtigten Rohstoffbasis (erstmalig) die im Zuge der THG-Quote (Gesetz zur Änderung der Förderung von Biokraftstoffen, 2009) von den Wirtschaftsteilnehmern selbst bilanzierten bzw. angesetzten THG-Emissionen, wie sie die BLE im Zuge ihres jährlichen Evaluations- und Erfahrungsberichts zur Biokraftstoff-/Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung (BLE, 2016) veröffentlicht, zugrunde. Die Emissionen der einzelnen Treibhausgase und Luftschadstoffe wurden dann vom UBA überschlägig auf Basis der publizierten Gesamt-THG-Emissionen unter Einbeziehung der Erkenntnisse des Forschungsvorhabens „BioEm“ (IFEU, 2016) und anderer Expertisen (IFEU, 2011) sowie verschiedener Annahmen und Analogieschlüsse abgeleitet. Da Informationen zu der Vielzahl der über alle Rohstoffe, Transport- und Herstellungswegen einfließenden Teilmengen nicht oder nur ansatzweise bekannt sind, ist die Verfahrensweise mit größeren Unsicherheiten behaftet.

Der Einsatz von reinem Pflanzenöl in landwirtschaftlichen Fahrzeugen mit für den Einsatz von Pflanzenöl ausgelegten Motoren zeigt, entsprechend aktuellen Messreihen des Technologie- und Förderzentrums Straubing (TFZ), keine signifikant abweichenden Motoremissionen gegenüber mineralischem Diesel in konventionellen Dieselmotoren. Bei älteren Motoren (nach EU-Abgasnorm 1-3B) sind die Motoremissionen etwas höher als bei Dieselmotoren, es kommt allerdings nicht zu gravierenden Abweichungen (Thuneke, 2013).

Für die Beimischung von Pflanzenöl zu mineralischem Diesel – was jedoch eher eine Ausnahme darstellt – ist ebenfalls nur von einer leichten Veränderung des fahrzeugbedingten Emissionsverhaltens auszugehen. Tabelle 127 gibt die Emissionsfaktoren der Pflanzenöl-Verwendung wieder.

Tabelle 130: Pflanzenöl-Emissionsfaktoren differenziert nach Rohstoffbasis*

Pflanzenöl	CO ₂ - Äq.	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	SO ₂ - Äq.	SO ₂	NO _x	Staub	CO	NMVOC
	[g/kWh]				[g/kWh]					
Raps										
Vorkette	128,34	54,61	0,11	0,24	0,12	0,09	0,05	0,04	0,07	0,01
Direkte	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,10	0,09	0,01	0,04	0,04

* keine Berücksichtigung von indirekten Landnutzungsänderungen, vgl. Kapitel 2.1.3

Quelle: UBA auf Basis von BLE (BLE, 2016) und ZSE (UBA, 2017)

Der THG-Emissionsfaktor von fossilem Kraftstoff (vgl. Tabelle 128) bilden die Grundlage um die vermiedenen Emissionen, die aus dem Einsatz von Pflanzenöl resultieren, zu bestimmen. Um eine differenzierte Bilanzierung der betrachteten Treibhausgase und Luftschadstoffe vornehmen zu können,

wurden die Emissionsfaktoren der einzelnen Treibhausgase und Luftschadstoffe mit den entsprechenden Angaben für Dieselkraftstoff der Ökobilanzdatenbank GEMIS 4.94 ergänzt.

Tabelle 131: Emissionsfaktoren von mineralischem Diesel

Dieselkraftstoff	CO ₂ -Äq.	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	SO ₂ -Äq.	SO ₂	NO _x	Staub	CO	NMVOC
	[g/kWh]				[g/kWh]			[g/kWh]		
Vorkette	34,94	32,72	0,07	0,00	0,18	0,11	0,10	0,02	0,05	0,04
Direkte	266,40	266,40	0,00	0,00	0,16	0,10	0,09	0,01	0,04	0,04

Quelle: auf Grundlage Richtlinie 2009/28/EG (Anhang V) angepasst mit GEMIS 4.94 (IINAS, 2016) und ZSE (UBA, 2017)

6.3.1.4 Emissionsbilanz

Die Netto-Emissionsbilanz der Pflanzenölbereitstellung im Kraftstoffsektor errechnet sich aus den oben angegebenen Einzelgrößen. In Hinblick auf die Wirkungskategorie Treibhausgasereffekt wurden durch den Einsatz von Pflanzenöl Treibhausgasemissionen in Höhe von ca. 7.266 t CO₂-Äq. vermieden. Der spezifische Vermeidungsfaktor beträgt 173 g CO₂-Äq. / kWh. Der Einsatz von Pflanzenöl führt bei Stickoxiden, Staub und Kohlenmonoxid zu höheren Emissionen. Emissionsminderungen resultieren beim Schwefeldioxid und bei den flüchtigen organischen Verbindungen.

Tabelle 132: Emissionsbilanz der Pflanzenölnutzung

	brutto vermiedene Emissionen [t]	verursachte Emissionen [t]	netto vermiedene Emissionen [t]	Netto-Vermeidungsfaktor [g/kWh]
CO ₂ -Äq.	12.656	5.390	7.266	172,99
CO ₂	12.563	2.294	10.269	244,51
CH ₄	3	5	-1	-0,03
N ₂ O	0	10	-10	-0,24
SO ₂ -Äq.	14	12	2	0,06
SO ₂	9	8	1	0,02
NO _x	8	6	2	0,05
Staub	1	2	-1	-0,02
CO	4	5	-1	-0,02
NMVOC	4	2	1	0,03

Quelle: Eigene Berechnung

6.4 Biomethan

Biomethan⁸⁸ wird aus Rohbiogas durch unterschiedliche Aufbereitungsverfahren - bei denen der Methangehalt durch Abscheidung von Gasbestandteilen erhöht wird - gewonnen. Die Aufbereitung von

⁸⁸ Die Begriffe Biomethan und Bioerdgas werden häufig als Bezeichnung für Methan biologischen Ursprungs genutzt. Es handelt sich dabei um Biogas, das auf Erdgasqualität aufbereitet ins Erdgasnetz eingespeist werden kann. In diesem Bericht wird durchgängig der Begriff Biomethan verwendet.

Biogas muss, um äquivalent als Kraftstoff einsetzbar zu sein, den Anforderungen der DIN 51624 „Erdgas als Kraftstoff“ zur Gasbeschaffenheit entsprechen.

6.4.1.1 Endenergiebereitstellung

Die Angaben zur Bereitstellung von Biomethan werden von der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) übernommen (vgl. Kapitel 2.2.1). Der in Tabelle 130 angegebene Datenstand entspricht der BMWi-Publikation „Erneuerbare Energie in Zahlen - Nationale und internationale Entwicklung“ (BMWi, 2017), die jährlich im August/September veröffentlicht wird. Zusätzlich erfolgt zum Jahresende sowie zum Februar/März eine Datenaktualisierung⁸⁹.

Tabelle 133: Biomethanverbrauch im Verkehrssektor

	2016 [GWh]
Biomethan	370

Quelle: (AGEE-Stat, 2017)

6.4.1.2 Substitutionsfaktoren

Der Berechnung der Substitutionsbeziehung zwischen Erdgas und Biomethan liegen die folgenden Annahmen zugrunde: Eine kWh Biomethan ersetzt eine kWh Erdgas. Dieses Verhältnis begründet sich damit, dass sich aufbereitetes Biogas von Erdgas höchstens marginal unterscheidet.

6.4.1.3 Emissionsfaktoren

Die Treibhausgasemissionen der Biomethanbereitstellung sind, ähnlich der Biogasproduktion, von folgenden Einflussgrößen bestimmt:

- ▶ Art der eingesetzten Biomasse und Anbau
- ▶ Transport und Lagerung der Biomasse (u. a. Silierung der Biomasse)
- ▶ Anlagen- und Fermentationstechnik (u. a. Leckage von Fermentern)
- ▶ Gärrestlagerung und- ausbringung (u. a. offene oder geschlossene Gärrestlagerung)
- ▶ Aufbereitung des Rohbiogases auf Erdgasqualität
- ▶ Transport des Biomethans zur Tankstelle und Bereitstellung

Bei der Aufbereitung von Rohbiogas zu Biomethan entstehen ggü. der Biogasgewinnung zusätzliche klimarelevante Treibhausgasemissionen, abhängig insb. vom Methanschleupf der Aufbereitungstechnik, einer vorhandenen Abgasnachverbrennung sowie der Energieversorgung der Aufbereitungs- und Einspeiseanlage (BMU, 2012b).

Das im Jahr 2015 im Verkehrssektor genutzte Biomethan basierte zu 100% auf Abfällen/Reststoffen, insbesondere handelte es sich dabei um Schlempe aus der Bioethanolherstellung (inkl. Stroh) sowie zu einem geringen Anteil aus Biotonnenabfällen.

Tabelle 134: Rohstoffbasis des genutzten Biomethans

	Abfall/Reststoffe [%]	Energiepflanzen [%]	Gülle [%]
Biomethan	100,0	0,0	0,0

⁸⁹ Die aktuellen Daten in der Zeitreihe ab 1990 sind abrufbar unter: http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html

Quelle: (BLE, 2016)

Der UBA-Emissionsberechnung für Biomethan (für das Jahr 2016) liegen neben der bislang berücksichtigten Rohstoffbasis (erstmalig) die im Zuge der THG-Quote (Gesetz zur Änderung der Förderung von Biokraftstoffen, 2009) von den Wirtschaftsteilnehmern selbst bilanzierten bzw. angesetzten THG-Emissionen, wie sie die BLE im Zuge ihres jährlichen Evaluations- und Erfahrungsberichts zur Biokraftstoff-/Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung (BLE, 2016) veröffentlicht, zugrunde. Die Emissionen der einzelnen Treibhausgase und Luftschadstoffe wurden dann vom UBA überschlägig auf Basis der publizierten Gesamt-THG-Emissionen unter Einbeziehung der Erkenntnisse des Forschungsvorhabens „BioEm“ (IFEU, 2016) und anderer Expertisen (IFEU, 2011) sowie verschiedener Annahmen und Analogieschlüsse abgeleitet. Da Informationen zu der Vielzahl der über alle Rohstoffe, Transport- und Herstellungswegen einfließenden Teilmengen nicht oder nur ansatzweise bekannt sind, ist die Verfahrensweise mit größeren Unsicherheiten behaftet. Tabelle 132 gibt die Emissionsfaktoren der Biomethan-Nutzung wieder.

Tabelle 135: Biomethan-Emissionsfaktoren differenziert nach Rohstoffbasis

Biomethan	CO ₂ -	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	SO ₂ -	SO ₂	NO _x	Staub	CO	NMVOC
	Äq.	[g/kWh]				Äq.	[g/kWh]			
Abfall										
Vorkette	47,42	31,84	0,61	0,00	0,12	0,05	0,09	0,01	0,04	0,00
Direkte	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,01	0,10	0,00	0,06	0,01

Quelle: UBA auf Basis von BLE (BLE, 2016) und ZSE (UBA, 2017)

Da der in Richtlinie 2009/28/EG für fossile Kraftstoffe angegebene THG-Emissionsfaktor nicht die Substitutionsbeziehungen in dem Bereich widerspiegelt und deutlich höher als der für Erdgas (CNG) ist, wird – auch abweichend zu den BLE-Berechnungen – der Emissionsfaktor für die CNG-Erdgasbereitstellung der Ökobilanzdatenbank GEMIS 4.94 entnommen (vgl. Tabelle 133).

Tabelle 136: Emissionsfaktoren von CNG-Erdgas bzw. CNG-Erdölgas

Erdgas, Erdöl- gas (CNG)	CO ₂ -	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	SO ₂ -	SO ₂	NO _x	Staub	CO	NMVOC
	Äq.	[g/kWh]				Äq.	[g/kWh]			
VK inkl. Hilfsenergie	48,91	27,23	0,85	0,00	0,08	0,01	0,10	0,00	0,06	0,01
Direkte	201,60	201,60	0,00	0,00	0,08	0,01	0,10	0,00	0,06	0,01

Quelle: auf Grundlage Richtlinie 2009/28/EG (Anhang V) angepasst mit GEMIS 4.94 (IINAS, 2016) und ZSE (UBA, 2017)

6.4.1.4 Emissionsbilanz

Die Netto-Emissionsbilanz der Biomethanbereitstellung errechnet sich aus den oben angegebenen Einzelgrößen. Im Hinblick auf die Wirkungskategorie Treibhausgaseffekt wurden durch den Einsatz von Biomethan Treibhausgasemissionen in Höhe von ca. 75.000 t CO₂-Äq. vermieden. Der spezifische Vermeidungsfaktor beträgt 203 g CO₂-Äq. / kWh bezogen auf den Gesamteinsatz von Biomethan.

Tabelle 137: Emissionsbilanz der Biomethannutzung

	brutto vermiedene Emissionen [t]	verursachte Emissionen [t]	netto vermiedene Emissionen [t]	Netto-Vermeidungs- faktor [g/kWh]
CO₂-Äq.	92.689	17.544	75.145	203,09
CO ₂	84.666	11.782	72.885	196,99
CH ₄	315	225	91	0,25
N ₂ O	0	1	0	0,00
SO₂-Äq.	58	71	-13	-0,03
SO ₂	6	22	-16	-0,04
NO _x	76	71	5	0,01
Staub	3	5	-1	0,00
CO	47	37	10	0,03
NMVOC	8	6	3	0,01

Quelle: Eigene Berechnung

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Netto vermiedene Treibhausgasemissionen durch die Nutzung erneuerbarer Energien im Jahr 2016.....	30
Abbildung 2:	Anteile der Sektoren an der Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energien und den dadurch vermiedenen THG-Emissionen im Jahr 2016	31
Abbildung 3:	Durch den Einsatz erneuerbarer Energien zur Brutto-Stromerzeugung vermiedene und verursachte Treibhausgasemissionen im Jahr 2016 nach Energieträgern	33
Abbildung 4:	Spezifische Treibhausgasbilanz der Brutto-Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien im Jahr 2016 nach Energieträgern	33
Abbildung 5:	Durch die Wärmebereitstellung aus erneuerbaren Energien vermiedene und verursachte Treibhausgasemissionen im Jahr 2016 nach Energieträgern	34
Abbildung 6:	Spezifische Treibhausgasemissionen der Wärmebereitstellung aus erneuerbaren Energien im Jahr 2016 nach Energieträgern	35
Abbildung 7:	Durch die Nutzung von erneuerbaren Energien im Verkehrssektor vermiedene und verursachte Treibhausgasemissionen im Jahr 2016 nach Energieträgern	36
Abbildung 8:	Spezifische Treibhausgasemissionen durch die Nutzung von erneuerbaren Energien im Verkehrssektor im Jahr 2016 nach Energieträgern	36
Abbildung 9:	Netto vermiedene säurebildende Luftschadstoffemissionen durch die Nutzung erneuerbarer Energien im Jahr 2016	38
Abbildung 10:	Durch den Einsatz erneuerbarer Energien im Strom-, Wärme sowie Verkehrssektor im Jahr 2016 vermiedene und verursachte säurebildende Schadstoffemissionen nach Energieträgern	39
Abbildung 11:	Netto vermiedene und verursachte Staubemissionen durch die Nutzung erneuerbarer Energien im Jahr 2016	40
Abbildung 12:	Durch den Einsatz erneuerbarer Energien im Strom-, Wärme sowie Verkehrssektor im Jahr 2016 vermiedene und verursachte Staubemissionen nach Energieträgern.....	41
Abbildung 13:	Anteil der EE-Bruttostromerzeugung an den netto vermiedenen THG-Gesamtemissionen durch die Nutzung erneuerbarer Energien.....	42
Abbildung 14:	Anteil des EE-Wärmeverbrauchs an den netto vermiedenen THG-Gesamtemissionen durch die Nutzung erneuerbarer Energien.....	79
Abbildung 15:	Anteil des EE-Verbrauchs im Verkehrssektor an den netto vermiedenen THG-Gesamtemissionen durch die Nutzung erneuerbarer Energien*	123

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Ziele der Bundesregierung zum Ausbau der erneuerbaren Energien	16
Tabelle 2:	Übersicht der betrachteten Treibhausgase und Luftschadstoffe	18
Tabelle 3:	Vorläufige Schätzwerte für Emissionen infolge von indirekten Landnutzungsänderungen durch Biokraftstoffe und flüssige Biobrennstoffe (g CO ₂ -Äq. / MJ)	23
Tabelle 4:	Emissionsbilanz für wesentliche Treibhausgase durch erneuerbare im Strom-, Wärme- und Verkehrssektor im Jahr 2016	32
Tabelle 5:	Emissionsvermeidung wesentlicher Luftschadstoffe durch erneuerbare Strom-, Wärme- und Kraftstoffbereitstellung im Jahr 2016	37
Tabelle 6:	Mittlere Brutto-Nutzungsgrade der Stromerzeugung aus konventionellen Energieträgern (Mittelung von Kondensations- und KWK-Betrieb)	42
Tabelle 7:	Emissionsfaktoren der Stromerzeugung aus konventionellen Energieträgern	43
Tabelle 8:	Stromerzeugung aus Photovoltaik	44
Tabelle 9:	Substitutionsfaktoren der Stromerzeugung aus Photovoltaik	44
Tabelle 10:	Emissionsfaktoren der Stromerzeugung aus Photovoltaik	45
Tabelle 11:	Emissionsbilanz der Stromerzeugung aus Photovoltaik	46
Tabelle 12:	Stromerzeugung aus Windenergie an Land (onshore)	47
Tabelle 13:	Substitutionsfaktoren der Stromerzeugung aus Windenergie an Land (onshore)	47
Tabelle 14:	Eingangsparemeter der betrachteten Referenz-Windkraftanlagen	48
Tabelle 15:	Emissionsfaktoren der Stromerzeugung aus Windenergie an Land (onshore)	48
Tabelle 16:	Emissionsbilanz der Stromerzeugung aus Windenergie an Land (onshore)	49
Tabelle 17:	Stromerzeugung aus Windenergie auf See (offshore)	50
Tabelle 18:	Substitutionsfaktoren der Stromerzeugung aus Windenergie auf See (offshore)	50
Tabelle 19:	Emissionsfaktoren der Stromerzeugung aus Windenergie auf See (offshore)	51
Tabelle 20:	Emissionsbilanz der Stromerzeugung aus Windenergie auf See (offshore)	51
Tabelle 21:	Stromerzeugung aus Wasserkraft	52
Tabelle 22:	Substitutionsfaktoren der Stromerzeugung aus Wasserkraft	53
Tabelle 23:	Emissionsfaktoren der Stromerzeugung aus Wasserkraft	53
Tabelle 24:	Emissionsbilanz der Stromerzeugung aus Wasserkraft	54
Tabelle 25:	Stromerzeugung aus Tiefengeothermie	54

Tabelle 26:	Substitutionsfaktoren der Stromerzeugung aus Tiefengeothermie... 55
Tabelle 27:	Basisannahmen des verwendeten Ökobilanz-Datensatzes für die geothermische Stromerzeugung 56
Tabelle 28:	Emissionsfaktoren der geothermischen Stromerzeugung 56
Tabelle 29:	Emissionsbilanz der geothermischen Stromerzeugung..... 57
Tabelle 30:	Stromerzeugung aus fester Biomasse 58
Tabelle 31:	Substitutionsfaktoren der Stromerzeugung aus fester Biomasse 58
Tabelle 32:	Basisannahmen der Referenzfälle für die Stromerzeugung aus fester Biomasse und geschätzter Anteil der Referenzfälle am Erzeugungsmix..... 59
Tabelle 33:	Emissionsfaktoren der Stromerzeugung aus fester Biomasse geordnet nach eingesetztem Brennstoff..... 60
Tabelle 34:	Emissionsbilanz der Stromerzeugung aus fester Biomasse..... 61
Tabelle 35:	Stromerzeugung aus Biogas und Biomethan..... 62
Tabelle 36:	Substitutionsfaktoren der Stromerzeugung aus Biogas und Biomethan 63
Tabelle 37:	Basisannahmen der Referenzfälle für die Stromerzeugung aus Biogas und Biomethan sowie geschätzter Anteil der Referenzfälle am Erzeugungsmix..... 64
Tabelle 38:	Primärenergiebezogene Emissionsfaktoren der Stromerzeugung aus Biogas/Biomethan nach Gärsubstrat..... 65
Tabelle 39:	Emissionsbilanz der Stromerzeugung aus Biogas 67
Tabelle 40:	Emissionsbilanz der Stromerzeugung aus Biomethan..... 67
Tabelle 41:	Stromerzeugung aus flüssiger Biomasse 68
Tabelle 42:	Substitutionsfaktoren der Stromerzeugung aus flüssiger Biomasse.. 68
Tabelle 43:	Basisannahmen der Referenzfälle für die Stromerzeugung aus flüssiger Biomasse und geschätzter Anteil der Referenzfälle am Erzeugungsmix..... 69
Tabelle 44:	Emissionsfaktoren der Stromerzeugung aus flüssiger Biomasse 70
Tabelle 45:	Emissionsbilanz der Stromerzeugung aus flüssiger Biomasse..... 71
Tabelle 46:	Stromerzeugung aus Klärgas 71
Tabelle 47:	Substitutionsfaktoren der Stromerzeugung aus Klärgas 72
Tabelle 48:	Emissionsfaktoren der Stromerzeugung aus Klärgas 72
Tabelle 49:	Mittlerer Brutto-Nutzungsgrad der Stromerzeugung aus Klärgas (Mittelung von Kondensations- und KWK-Betrieb) 73
Tabelle 50:	Emissionsbilanz der Stromerzeugung aus Klärgas..... 73
Tabelle 51:	Stromerzeugung aus Deponiegas 74
Tabelle 52:	Substitutionsfaktoren der Stromerzeugung aus Deponiegas..... 74

Tabelle 53:	Emissionsfaktoren der Stromerzeugung aus Deponiegas	75
Tabelle 54:	Mittlerer Brutto-Nutzungsgrad der Stromerzeugung aus Deponiegas (Mittelung von Kondensations- und KWK-Betrieb)	75
Tabelle 55:	Emissionsbilanz der Stromerzeugung aus Deponiegas	76
Tabelle 56:	Stromerzeugung aus dem biogenen Anteil des Siedlungsabfalls	76
Tabelle 57:	Substitutionsfaktoren der Stromerzeugung aus dem biogenen Anteil des Siedlungsabfalls	77
Tabelle 58:	Emissionsfaktoren der Stromerzeugung aus dem biogenen Anteil des Siedlungsabfalls	77
Tabelle 59:	Mittlerer Brutto-Nutzungsgrad der Stromerzeugung aus dem biogenen Anteil des Abfalls (Mittelung von Kondensations- und KWK- Betrieb)	78
Tabelle 60:	Emissionsbilanz der Stromerzeugung aus dem biogenen Anteil des Abfalls	78
Tabelle 61:	Mittlere Brutto-Nutzungsgrade der Wärmebereitstellung aus konventionellen Energieträgern (Mittelung von Kondensations- und KWK-Betrieb)	79
Tabelle 62:	Emissionsfaktoren der Wärmebereitstellung aus fossilen Energieträgern in privaten Haushalten, im GHD-Sektor und der Industrie	80
Tabelle 63:	Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in privaten Haushalten und im GHD-Sektor	81
Tabelle 64:	Substitutionsfaktoren der Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in privaten Haushalten und im GHD-Sektor im Bezug auf die angewendete Technik	82
Tabelle 65:	Durchschnittlicher Nutzungsgrad der Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in privaten Haushalten und im GHD-Sektor	83
Tabelle 66:	Emissionsfaktoren der Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in privaten Haushalten und im GHD-Sektor	83
Tabelle 67:	Emissionsbilanz der Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in Einzelfeuerungen (private Haushalte und GHD)	85
Tabelle 68:	Emissionsbilanz der Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in Scheitholz-Zentralfeuerungen (private Haushalte und GHD)	86
Tabelle 69:	Emissionsbilanz der Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in Pellet-Zentralfeuerungen (private Haushalte und GHD)	86
Tabelle 70:	Wärmebereitstellung (Endenergie) aus fester Biomasse in der Industrie	87
Tabelle 71:	Substitutionsfaktoren der Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in der Industrie in Bezug auf die angewendete Technik	87
Tabelle 72:	Basisannahmen der Referenzfälle für die Wärmebereitstellung aus fester Biomasse und geschätzter Anteil der Referenzfälle am Endenergiemix	88

Tabelle 73:	Emissionsfaktoren der Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in privaten Haushalten und im GHD-Sektor	89
Tabelle 74:	Emissionsbilanz der Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in der Industrie.....	91
Tabelle 75:	Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in Heiz(kraft)werken der allgemeinen Versorgung.....	92
Tabelle 76:	Substitutionsfaktoren der Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in Heiz(kraft)werken der allgemeinen Versorgung	92
Tabelle 79:	Fossiler Brennstoffmix für die Erzeugung von Fernwärme	93
Tabelle 77:	Basisannahmen der Referenzfälle für die Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in Heiz(kraft)werken der allgemeinen Versorgung..	94
Tabelle 78:	Emissionsfaktoren der Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in Heiz(kraft)werken der allgemeinen Versorgung	94
Tabelle 80:	Emissionsbilanz der Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in Heiz(kraft)werken der allgemeinen Versorgung	96
Tabelle 81:	Wärmebereitstellung aus flüssiger Biomasse und Biodieseinsatz in der Landwirtschaft.....	97
Tabelle 82:	Substitutionsfaktoren der Wärmebereitstellung aus flüssiger Biomasse und des Biodieseinsatzes in der Landwirtschaft	97
Tabelle 83:	Basisannahmen der Referenzfälle für die Wärmebereitstellung aus flüssiger Biomasse	98
Tabelle 84:	Emissionsfaktoren der Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in privaten Haushalten und im GHD-Sektor	99
Tabelle 85:	Emissionsbilanz der Wärmebereitstellung aus Pflanzenöl	100
Tabelle 86:	Emissionsbilanz der Wärmebereitstellung aus flüssiger Biomasse (Industrie)	100
Tabelle 87:	Emissionsbilanz des Biodiesel und HVO-Einsatzes in der Landwirtschaft	101
Tabelle 88:	Wärmebereitstellung aus gasförmiger Biomasse.....	102
Tabelle 89:	Substitutionsfaktoren der Wärmebereitstellung aus gasförmiger Biomasse.....	103
Tabelle 90:	Basisannahmen der verwendeten Ökobilanz-Datensätze für die Wärmebereitstellung aus gasförmiger Biomasse.....	104
Tabelle 91:	Emissionsfaktoren der Wärmebereitstellung aus gasförmiger Biomasse.....	105
Tabelle 92:	Emissionsbilanz der Wärmebereitstellung aus Biogas	106
Tabelle 92:	Emissionsbilanz der Wärmebereitstellung aus Biomethan.....	107
Tabelle 93:	Emissionsbilanz der Wärmebereitstellung aus Klärgas	107
Tabelle 94:	Emissionsbilanz der Wärmebereitstellung aus Deponiegas.....	108

Tabelle 95:	Wärmebereitstellung aus dem biogenen Anteil des Siedlungsabfalls	109
Tabelle 96:	Substitutionsfaktoren der Wärmebereitstellung aus dem biogenen Anteil des Siedlungsabfalls	109
Tabelle 97:	Basisannahmen der Referenzfälle für die Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in Heiz(kraft)werken der allgemeinen Versorgung	110
Tabelle 98:	Emissionsfaktoren der Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in Heiz(kraft)werken der allgemeinen Versorgung	110
Tabelle 99:	Emissionsbilanz der Wärmebereitstellung aus dem biogenen Anteil des Siedlungsabfalls.....	110
Tabelle 100:	Wärmebereitstellung aus Solarthermie	112
Tabelle 101:	Substitutionsfaktoren der Wärmebereitstellung aus Solarthermie.	112
Tabelle 102:	Basisannahmen der verwendeten Ökobilanz-Datensätze für die Wärmebereitstellung aus Solarthermie	113
Tabelle 103:	Emissionsfaktoren der Wärmebereitstellung aus Solarthermie	113
Tabelle 104:	Emissionsbilanz der Wärmebereitstellung aus Solarthermie.....	114
Tabelle 105:	Wärmebereitstellung aus Wärmepumpen.....	115
Tabelle 106:	Substitutionsfaktoren der Wärmebereitstellung mittels Wärmepumpen.....	115
Tabelle 107:	Basisannahmen der verwendeten Ökobilanz-Datensätze für Wärmepumpen.....	116
Tabelle 108:	Emissionsfaktoren der Wärmebereitstellung mittels Wärmepumpen.....	117
Tabelle 109:	Emissionsbilanz der erneuerbaren Wärmebereitstellung aus Umgebungswärme (Wärmepumpe – aerothermisch, Erdgas-Wärmepumpe).....	118
Tabelle 110:	Emissionsbilanz der erneuerbaren Wärmebereitstellung aus oberflächennaher Geothermie (Wärmepumpe - geothermisch).....	118
Tabelle 110:	Emissionsbilanz der erneuerbaren Wärmebereitstellung aus oberflächennaher Geothermie (Wärmepumpe - hydrothermisch) .	119
Tabelle 110:	Wärmebereitstellung aus Tiefengeothermie	119
Tabelle 111:	Substitutionsfaktoren der Wärmebereitstellung aus Tiefengeothermie	120
Tabelle 112:	Basisannahmen des verwendeten Ökobilanz-Datensatzes für die Wärmebereitstellung aus Tiefengeothermie	120
Tabelle 113:	Emissionsfaktoren der Wärmebereitstellung aus Wärmepumpen..	121
Tabelle 114:	Emissionsbilanz der Wärmebereitstellung aus Tiefengeothermie...	121
Tabelle 115:	Verbrauch von Biodiesel und HVO im Verkehrssektor	124
Tabelle 116:	Rohstoffbasis des genutzten Biodiesels/HVOs	125

Tabelle 117:	Biodiesel- und HVO-Emissionsfaktoren differenziert nach Rohstoffbasis*	125
Tabelle 118:	Emissionsfaktoren von mineralischem Diesel	127
Tabelle 119:	Emissionsbilanz der Biodiesel-/HVO-Nutzung.....	128
Tabelle 120:	Bioethanolverbrauch im Verkehrssektor.....	128
Tabelle 121:	Rohstoffbasis des genutzten Bioethanols	129
Tabelle 122:	Bioethanol-Emissionsfaktoren differenziert nach Rohstoffbasis* ..	129
Tabelle 123:	Emissionsfaktoren von Ottokraftstoff	131
Tabelle 124:	Emissionsbilanz der Bioethanolnutzung.....	131
Tabelle 125:	Pflanzenölverbrauch	132
Tabelle 126:	Rohstoffbasis des genutzten Pflanzenöls	133
Tabelle 127:	Pflanzenöl-Emissionsfaktoren differenziert nach Rohstoffbasis* ...	133
Tabelle 128:	Emissionsfaktoren von mineralischem Diesel	134
Tabelle 129:	Emissionsbilanz der Pflanzenölnutzung.....	134
Tabelle 130:	Biomethanverbrauch im Verkehrssektor	135
Tabelle 131:	Rohstoffbasis des genutzten Biomethans	135
Tabelle 132:	Biomethan-Emissionsfaktoren differenziert nach Rohstoffbasis	136
Tabelle 133:	Emissionsfaktoren von CNG-Erdgas bzw. CNG-Erdölgas	136
Tabelle 134:	Emissionsbilanz der Biomethannutzung.....	137

Begriffserklärungen

Im Folgenden werden - thematisch sortiert - die wesentlichen Begrifflichkeiten im Sinne der Verwendung in diesem Bericht erklärt.

Energie

Energie ist die Fähigkeit eines Körpers Arbeit zu verrichten. Energie und Arbeit werden üblicherweise in der Einheit Joule [J] oder Wattsekunden [Ws] (bzw. Kilowattstunden [kWh]) angegeben.

Als **Energiequellen** bezeichnet man das Element, welches die Energie zur Verfügung stellt. Man unterscheidet zwischen regenerativen, sich (unter natürlichen Bedingungen) erneuernden Energiequellen (wie z. B. Sonne, Wind, Fließwasser, Gezeitenhub, Erdwärme) und erschöpflichen, sich nicht (oder nur über einen sehr langen Zeitraum) erneuernden, fossilen Energiequellen.

Energieträger sind physikalische Erscheinungsformen und Stoffe, in denen Energie in Form von chemischen oder physikalischen Bindungsenergien, elektromagnetischer Strahlungsenergie, mechanischer, thermischer oder elektrischer Energie gespeichert ist. Man unterscheidet Primär- und Sekundärenergieträger.

Primärenergieträger sind die in ihrer natürlichen / ursprünglichen Form vorliegenden Energieträger. Ihr Energiegehalt wird als Primärenergie bezeichnet. Man unterteilt sie entsprechend ihrer (ursprünglichen) Energiequelle in Primärenergieträger aus nicht-regenerativen (fossilen und nuklearen) Energiequellen und Primärenergieträger aus regenerativen (erneuerbaren) Energiequellen.

Fossile Energiequellen sind i.d.R. Lagerstätten, in denen Biomasse im Laufe von Jahrtausenden unter hohem Druck und Temperatur in Energierohstoffe mit unterschiedlich langen Kohlenstoffverbindungen (Kohle, Erdöl, Erdgas) umgewandelt wurde.

Erneuerbare Energiequellen sind solche, die nicht durch Lagerstätten begrenzt sind, sondern nach den Zeitmaßstäben des Menschen unendlich lange zu Verfügung stehen bzw. sich ständig erneuern. Solarstrahlung, Erdwärme (Geothermie) und Gezeitenkraft können entweder direkt oder indirekt z. B. in Form von Biomasse, Wind, Wasserkraft, Umgebungswärme sowie Wellenenergie genutzt werden. Im Sinne des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) gehören zu ihnen: Wasserkraft einschließlich der Wellen-, Gezeiten-, Salzgradienten- und Strömungsenergie, Windenergie, solare Strahlungsenergie, Geothermie, Energie aus Biomasse einschließlich Biogas, Deponiegas und Klärgas sowie der biologisch abbaubare Anteil von Abfällen aus Haushalten und Industrie.

Sekundärenergieträger werden durch einen oder mehrere Umwandlungsschritte aus Primärenergieträgern gewonnen. Dabei fallen zwangsläufig Umwandlungs- und Verteilungsverluste an. Die wichtigsten Sekundärenergieträger sind Strom, Fernwärme, Heizöl und Ottokraftstoff.

Der **Substitutionsfaktor** beschreibt, in welchem Maße bestimmte Energieträger durch einen anderen Energieträger ersetzt werden. In diesem Bericht beschreiben die Substitutionsfaktoren insbesondere den Ersatz fossiler Primär- und Sekundärenergieträger durch erneuerbare Energien.

Energieumwandlung: Exergie ist derjenige Teil der Energie, der sich theoretisch in einem reversiblen Vergleichsprozess vollständig in jede andere Energieform umwandeln lässt. Trotz gleicher Energieinhalte ist die Arbeitsfähigkeit verschiedener Energieformen sehr unterschiedlich. So lässt sich etwa elektrischer Strom vollständig in jede andere Energieform umwandeln, während thermische Energie bei der Umwandlung in mechanische und elektrische Energie immer dem Carnot-Wirkungsgrad unterworfen ist. Als Anergie bezeichnet man die Differenz zwischen Energie und Exergie. Anergie ist somit der nicht nutzbare Anteil der Energie.

Als **Nutzenergie** wird diejenige Energieform bezeichnet, die dem Energieanwender nach der letzten Umwandlung zur Deckung seiner Bedürfnisse bzw. Inanspruchnahme einer Energiedienstleistung zur

Verfügung steht. Mögliche Formen der Nutzenergie sind unter anderem mechanische Energie, Wärme, Kälte, Licht.

Der **Energieverbrauch** bezeichnet umgangssprachlich die für die zeitliche Dauer der Inanspruchnahme einer Energiedienstleistung eingesetzte Energiemenge und wird i.d.R. in Wattsekunden [Ws] bzw. Kilowattstunden [kWh] angeben.

Der **Endenergieverbrauch** bezeichnet entsprechend die Summe der vom Anwender eingesetzten Primär- und Sekundärenergieträger zur unmittelbaren Erzeugung von Nutzenergie nach Abzug der Umwandlungs- und Verteilungsverluste.

Emissionen

Der Begriff **Emissionen** bezeichnet im Allgemeinen alle in die Umwelt abgegebene feste, flüssige und gasförmige Schadstoffe sowie die Abgabe von Wärme, Strahlung, Geräusche etc. durch z. B. Erzeugung, Verteilung, Entsorgung, Leitungsbau etc.

Im Rahmen dieses Berichts wird jedoch nur die Freisetzung von ausgewählten Treibhausgasen und Luftschadstoffen in die Atmosphäre betrachtet, die im Zuge der Nutzung von Energie bzw. durch die Inanspruchnahme von Energiedienstleistungen verursacht werden. Dabei wird zwischen direkten, indirekten und Gesamt-Emissionen unterschieden.

Als **Direkte Emissionen** werden hier diejenigen Emissionen bezeichnet, die im Zuge der Umwandlung von Primär- und Sekundärenergieträgern in Endenergieträger, insbesondere bei der Verbrennung fossiler oder biogener Brennstoffe entstehen.

Indirekte (auch vorgelagerte) **Emissionen** beinhalten die Emissionen, die außerhalb der Umwandlungsprozesse (in den sog. Vorketten), insbesondere bei der Herstellung von Anlagen zur Energieumwandlung oder der Gewinnung und Bereitstellung von Energieträgern (z. B. beim Biomasse-Anbau und -Transport) verursacht werden.

Die **Gesamt-Emissionen** einzelner Energiebereitstellungspfade ergeben sich aus der Summe der direkten und indirekten Emissionen. Synonym wird der Begriff Emissionen mit Vorketten gebraucht.

Der **Emissionsfaktor (EF)** bezeichnet traditionell den Quotient aus der Masse eines emittierten Stoffes und der eingesetzten Masse oder Energie eines Ausgangsstoffes. Abweichend von dieser inputbezogenen Betrachtung wird der Emissionsfaktor in dieser Publikation in der Regel immer auf den Produktausstoß, d. h. die erzeugte Endenergie (z. B. kWh_{el} od. kWh_{th}) bezogen und ist entsprechend prozess- und anlagenspezifisch.

Treibhausgase sind atmosphärische Spurengase, die zum Treibhauseffekt beitragen und sowohl einen natürlichen als auch einen anthropogenen Ursprung haben können. Die wichtigsten Treibhausgase sind Kohlenstoffdioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Distickstoffoxid (N₂O / Lachgas).

Das **Treibhausgaspotenzial (THP)** (engl.: Global Warming Potential - GWP) ist das massebezogene Äquivalent der Treibhauswirkung von Treibhausgasen, bezogen auf das festgelegte Leit-Gas CO₂ - es wird als **CO₂-Äquivalent (CO₂-Äq.)** angegeben.

Kohlenstoffdioxid (CO₂) ist ein farb- und geruchloses Gas, das vor allem bei der vollständigen Oxidation von kohlenstoffhaltigen Stoffen entsteht. Kohlenstoffdioxid ist das wichtigste Treibhausgas. Als Referenzgas wird sein Treibhausgaspotenzial gleich 1 gesetzt.

Methan (CH₄) ist ein ungiftiges, farb- und geruchloses Gas. Nach Kohlenstoffdioxid (CO₂) ist es das bedeutendste von Menschen freigesetzte Treibhausgas. Nach den Richtlinien des Intergovernmental Panel on Climate Change von 1996 (IPCC, 2007) wird die Klimawirksamkeit von CH₄ im Zeitraum von 100 Jahren im Vergleich zu CO₂ als ca. 21-mal stärker eingeschätzt.

Distickstoffoxid /Lachgas (N₂O) ist ein farbloses Gas aus der Gruppe der Stickoxide. Neben Kohlenstoffdioxid (CO₂) und Methan (CH₄) ist es als direkt klimawirksames Gas relevant. Nach IPCC (1996) ist es 310-mal so stark klimawirksam wie Kohlenstoffdioxid, kommt allerdings in deutlich kleineren Mengen in der Atmosphäre vor. Die bedeutendste anthropogene Quelle von Distickstoffoxid-Emissionen ist der landwirtschaftliche Einsatz von Stickstoffdüngemitteln.

Der Begriff **säurebildende Schadstoffe** umfasst die Luftschadstoffe Schwefeldioxid (SO₂), Stickstoffoxide (NO_x), flüchtige organische Verbindungen (VOC) und Ammoniak (NH₃). Diese vier Stoffe tragen insbesondere zur Versauerung, zur Bodenentrophierung und zur Bildung troposphärischen Ozons bei.

Versauerungspotenzial (VP) (engl.: Acidification Potential - AP) ist das Ergebnis der Aggregation von versauernd wirkenden Luftschadstoffen. Es wird als **SO₂-Äquivalent (SO₂-Äq.)** angegeben.

Literaturverzeichnis

- AGEB. (2013). *Auswertungstabellen zur Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland*. Berlin: AGEB.
- AGEB. (2015). *Energiebilanz 2013*. Berlin: AGEB.
- AGEE-Stat. (2017). *Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland bis 2016*. Von BMWi: http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html abgerufen
- Agemar, T., Weber, J., & Schulz, R. (2014). Deep Geothermal Energy Production in Germany – Energies. *Deep Geothermal Energy Production in Germany – Energies 2014 Band 7 Heft 7, 4397–4416*, S. <https://www.geotis.de/> (abgerufen: 28.06.2017). Von <http://www.geotis.de> (Datenstand 19.08.2015) abgerufen
- Agostini, Giuntoli, & Boulamanti. (2013). *Carbon accounting of forest bioenergy*. European Commission - Joint Research Centre, Ispra (IT), Institute for Energy and Transport. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- BFE. (2016). *Schweizerische Holzenergiestatistik - Erhebung für das Jahr 2015*.
- BLE. (2016). *Evaluationsbericht- und Erfahrungsbericht für das Jahr 2015*. Bonn: BLE.
- BMEL, BMU. (2009). *Nationaler Biomasseaktionsplan für Deutschland*. Von http://www.bmel.de/DE/Landwirtschaft/Nachwachsende-Rohstoffe/_texte/Biomasseaktionsplan.html abgerufen
- BMU. (2012a). *Erneuerbare Energien- Fragen und Antworten*. Berlin: BMU.
- BMU. (2012b). *Evaluierung der Biomethanbereitstellung, -verteilung und -nutzung in Deutschland durch ein Marktmonitoring (BIOMON)*.
- BMWi. (2014a). *EEG Reform*. Von <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Erneuerbare-Energien/eeg-reform.html> abgerufen
- BMWi. (2016b). *Fünfter Monitoring-Bericht „Energie der Zukunft“*. Von <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/fuenfter-monitoring-bericht-energie-der-zukunft.html> abgerufen
- BMWi. (2017). *Erneuerbare Energien in Zahlen - Nationale und internationale Entwicklung*. Von BMWi: <http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/erneuerbare-energien-in-zahlen.html> abgerufen
- Braune, M., Grasemann, E., Gröngröft, A., Klemm, M., Oehmichen, K., & Zech, K. (2016). *Die Biokraftstoffproduktion in Deutschland - Stand der Technik und Optimierungsansätze*. Leipzig: DBFZ Report Nr. 22.
- BSW. (2017). *Statistische Zahlen der deutschen Solarwärmebranche (Solarthermie)*. Von BSW Bundesverband Solarwirtschaft: <http://www.solarwirtschaft.de/unsere-themen-solarthermie/zahlen-und-fakten.html> abgerufen
- Bundesregierung. (2010). *Energiekonzept*. Von <http://www.bmwi.de/DE/Themen/energie,did=405004.html> abgerufen
- Bundesregierung. (2011). *Energiepolitischen Beschlüsse*. Von <https://www.bundesregierung.de/ContentArchiv/DE/Archiv17/Artikel/2012/06/2012-06-04-artikel-hintergrund-energie-wende-gesetzespaket.html> abgerufen
- Bundesregierung. (2014). *Zwölftes Gesetz zur Änderung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes, vom 20. November 2014*. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2014 Teil I Nr. 53, ausgegeben zu Bonn am 25. November 2014, S. 1740, BGBl. I S. 1740.
- BWP. (2017). *Absatzzahlen 2016*. Von BWP Bundesverband Wärmepumpe: <http://www.waermepumpe.de/waermepumpe/zahlen-und-daten/jahreszahlen.html> abgerufen
- DBFZ. (2015). *Projekt: 03MAP250 Stromerzeugung aus Biomasse - Zwischenbericht Mai 2015*. DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum.
- DBFZ. (2015a). *Technische und methodische Grundlagen der THG-Bilanzierung von Biodiesel*. Leipzig: DBFZ.

- DBFZ. (2015b). *Technische und methodische Grundlagen der THG-Bilanzierung von Bioethanol*. Leipzig: DBFZ.
- Degel, & Jörß. (2009). *Aufbereitung von Daten der Emissionserklärungen gemäß 11. BImSchV aus dem Jahre 2004 für die Verwendung bei der UNFCCC- und UNECE-Berichterstattung - Teilbericht Stationäre Verbrennungsmotoren*. Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT). Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- DEPI. (2017). *Pelletproduktion und Inlandsbedarf in Deutschland*. Von <http://depi.de/de/infothek/grafiken/#pelletproduktion> abgerufen
- Destatis. (2016). *066 - Erhebung über die Elektrizitätsversorgung der Netzbetreiber*. Wiesbaden: Destatis.
- Destatis. (2016b). *Erhebung über die Energieverwendung der Betriebe des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden*. Wiesbaden: Destatis.
- Destatis. (2016c). *Erhebung über Erzeugung, Bezug, Verwendung und Abgabe von Wärme*. Wiesbaden: Destatis.
- DEWI GmbH. (2017). *Windenergienutzung in Deutschland - Stand 31.12.2016*. Von http://www.dewi.de/dewi_res/index.php?id=23 abgerufen
- DIN 51605:2010-09. (kein Datum). *Kraftstoffe für pflanzenöлтаugliche Motoren - Rapsölkraftstoff - Anforderungen und Prüfverfahren*.
- DIN 51625:2008-08. (kein Datum). *Kraftstoffe für Kraftfahrzeuge - Ethanolkraftstoffe - Anforderungen und Prüfverfahren*.
- DIN EN 14214:2014-06. (kein Datum). *Flüssige Mineralölerzeugnisse – Fettsäure-Methylester (FAME) zur Verwendung in Dieselmotoren und als Heizöl – Anforderungen und Prüfverfahren*.
- DWD. (2017). *Jährliche Strahlungskarte - flächendeckende Jahressumme der Globalstrahlung für das Jahr 2016*. Von DWD Deutscher Wetterdienst: <http://www.dwd.de/globalstrahlung> abgerufen
- ecoinvent. (2017). *ecoinvent V 3.3*. Von <http://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-33/ecoinvent-33.html> abgerufen
- EEWärmeG. (2008). *Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich (Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz - EEWärmeG)*. Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz vom 7. August 2008 (BGBl. I S. 1658), zuletzt durch Artikel 14 des Gesetzes vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066) geändert.
- EntSo-E. (2014). *European Network of Transmission System Operators for Electricity*. <https://www.entsoe.eu>.
- ESU. (2012). *Life Cycle Inventories of Hydroelectric Power Generation*. Uster (CH): ESU Services Ltd.
- Europäische Kommission. (2012). *Vorschlag für eine RICHTLINIE DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES zur Änderung der Richtlinie 98/70/EG über die Qualität von Otto- und Dieselmotoren und zur Änderung der Richtlinie 2009/28/EG*. COM(2012) 595 final.
- Europäische Kommission. (2015). *NOTE ON THE CONDUCTING AND VERIFYING ACTUAL CALCULATIONS OF GHG EMISSION SAVINGS*. Brüssel: BK/abd/ener.c.1(2015) 4507918.
- Europäische Kommission. (2016). *RICHTLINIE DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (Neufassung)*. Brüssel: COM(2016) 767 final.
- Europäische Kommission. (2017). *BERICHT DER KOMMISSION AN DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT, DEN RAT, DEN EUROPÄISCHEN WIRTSCHAFTS- UND SOZIALAUSSCHUSS UND DEN AUSSCHUSS DER REGIONEN Fortschrittsbericht „Erneuerbare Energiequellen“*. Brüssel: COM(2017) 57 final.
- Europäisches Parlament. (2015). *Änderung der Richtlinie über die Qualität von Kraftstoffen und Richtlinie über Energie aus erneuerbaren Quellen*. 2. Lesung am 28. April 2015.
- Fachverband Biogas. (7 2017). *Branchenzahlen 2016 und Prognose der Branchenentwicklung 2017*.
- Fehrenbach, H. (2013). Telefonisches Gespräch mit Horst Fehrenbach am 15.07.2013. Dessau.

- Fichtner, W., Karl, U., Hartel, R., Balussou, & D. (2011). *Fortschreibung der Emissionsfaktoren für Feuerungs- und Gasturbinenanlagen nach 13./17. BImSchV und TA Luft*. Karlsruhe: DFIU-KIT.
- Flessa, H., Delorme, J.-P., Fuß, R., Moffat, A., Petersen, U., Stichnothe, H., & Weiser, C. (2017). *Minderung von Treibhausgasemissionen im Rapsanbau*. Von <https://www.thuenen.de/de/institutsuebergreifende-projekte/minderung-von-treibhausgasemissionen-im-rapsanbau/> abgerufen
- Fraunhofer IWES. (2012). *Aktualisierung von Ökobilanzdaten für erneuerbare Energien im Bereich Treibhausgase und Luftschadstoffe - Abschnitt Windenergie*. Kassel: FraunhoferIWES.
- Fraunhofer IWES. (2017). *Windmonitor (Größenentwicklung der Windenergieanlagen Onshore)*. Von <http://www.windmonitor.de/> abgerufen
- Frey, Schulz, Horst, & Leprich. (2007). *Studie zu den Energieeffizienzpotenzialen durch Ersatz von elektrischem Strom im Raumwärmebereich*.
- Fritsche, U. R., & Schmidt, K. (2008). *Handbuch zu GEMIS 4.5*. Von <http://www.iinas.org/gemis-docs-de.html> abgerufen
- Gesetz zur Änderung der Förderung von Biokraftstoffen. (2009). Bonn: Bundesgesetzblatt Jahrgang 2009 Teil I Nr. 41.
- Gohlisch, G. (2013). Telefonisches Gespräch mit Gunnar Gohlisch (wissenschaftlicher Mitarbeiter) am 28.05.2013. Dessau.
- GZB. (2012). *Aktualisierung der Ökobilanzdaten für erneuerbare Energien im Bereich Treibhausgase und Luftschadstoffe - Teilbericht Geothermische Strom- und Wärmeerzeugung (unveröffentlicht)*. Hochschule Bochum - Internationales Geothermiezentrum.
- GZB. (2014). *Analyse des deutschen Wärmepumpenmarktes - Bestandsaufnahme und Trends*. Bochum.
- Heberle, Obermeier, & Brüggemann. (2012). *Mögliche Emissionen bei der Strom- und Wärmeerzeugung aus Geothermie durch den Einsatz von F-Gasen im Energiewandlungsprozess mittels ORC*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- Hofmann. (2010). *Nutzung der Potenziale des biogenen Anteils im Abfall zur Energieerzeugung*. Dresden.
- IEA-SHC. (2011). *Common Calculation Method: Solar Collector Energy Output*.
- IFEU. (2011). *Erweiterung der Treibhausgas-Bilanzen ausgewählter Biokraftstoffpfade*. Heidelberg.
- IFEU. (2016). *Aktualisierung der Eingangsdaten und Emissionsbilanzen wesentlicher biogener Energienutzungspfade (BioEm)*. Heidelberg.
- IINAS. (2016). *Globales Emissions-Modell integrierter Systeme*. Von <http://www.iinas.org/gemis-de.html> abgerufen
- INFRAS. (2014). *Handbuch der Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA) 3.2*. Von http://www.hbefa.net/e/index.html?hbefa/new_in_hbefa_32.html~inhal abgerufen
- IPCC. (2007). *IPCC Forth Assessment Report: Climate Change 2007 (AR4)*. Cambridge: Cambridge University Press.
- ISE. (2016). *Photovoltaics Report 2016*. Von <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/photovoltaics-report.html> abgerufen
- ISI. (2016). *CO₂-Minderung im Stromsektor durch den Einsatz erneuerbarer Energien im Jahr 2012 und 2013*. Karlsruhe: FraunhoferISI.
- Janczik, S., & Kaltschmitt, M. (2017). *Ökologische Analyse und Bewertung der Umwelteffekte effizienzsteigernder Maßnahmen von ORC-Geothermieanlagen*. Dessau-Roßlau: Climate Change 06/2017.
- JRC. (2014). *WELL-TO-TANK Report Version 4.a JEC WELL-TO-WHEELS ANALYSIS WELL-TO-WHEELS ANALYSIS OF FUTURE AUTOMOTIVE FUELS AND POWERTRAINS IN THE EUROPEAN CONTEXT*. Luxemburg: Publications Office of the European Union.

- JRC. (2017). *Definition of input data to assess GHG default emissions from biofuels in EU legislation*. Luxemburg: Publications Office of the European Union.
- Klöpper, W., & Grahl, B. (2009). *Ökobilanz (LCA): Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Liebetrau, J., Daniel-Gromke, J., Oehmichen, K., Weiland, P., Friehe, J., Clemens, J., & Hafermann, C. (2011). „Emissionsanalyse und Quantifizierung von Stoffflüssen durch Biogasanlagen im Hinblick auf die ökologische Bewertung der landwirtschaftlichen Biogasgewinnung und Inventarisierung der deutschen Landwirtschaft (FKZ: 22023606)“.
- Lohmann, Troy, Wagner, Baack, Eickelkamp, Epe, & Kloske. (2012). *Die Ökobilanz des Offshore-Windparks alpha ventus*. Münster: Lit.
- Nast, Drück, Hartmann, Kelm, Kilburg, Mangold, & Winter. (2009). *Evaluierung von Einzelmaßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien (Marktanreizprogramm) im Zeitraum Januar 2007 bis Dezember 2008*. Stuttgart.
- Öko-Institut. (2012). *Aktualisierung LCA-EE*.
- Rausch, L., & Fritsche, U. R. (2012). *Aktualisierung von Ökobilanzdaten für Erneuerbare Energien im Bereich Treibhausgase und Luftschadstoffe – Endbericht –*. Von http://www.oeko.de/das_institut/team/dok/630.php?id=8&dokid=1621&anzeige=det abgerufen
- Reisinger, Hartmann, & Nothhaft. (2009). *Evaluierung des BMU-Marktanreizprogramms: Teilbereich kleine Biomassekessel bis 100kW*. Berlin.
- Richtlinie (EU) 2015/1513. (2015). Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates vom 9. September 2015 zur Änderung der Richtlinie 98/70/EG über die Qualität von Otto- und Dieselmotoren und zur Änderung der Richtlinie 2009/28/EG zur Förderung der Nutzung von En.
- Richtlinie 2009/28/EG. (2009). Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG.
- Roth, Brückl, & Held. (2005). *Windenergiebedingte CO₂-Emissionen konventioneller Großkraftwerke*. München: Energie & Management.
- RWI/forsa. (2011). *Erhebung des Energieverbrauchs der privaten Haushalte für die Jahre 2006–2008*. Essen/Köln: RWI - Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung / forsa Gesellschaft für Sozialforschung und statistische Analysen mbH.
- RWI/forsa. (2015). *Erhebung des Energieverbrauchs der privaten Haushalte für die Jahre 2011–2013*. Essen/Köln: RWI - Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung / forsa Gesellschaft für Sozialforschung und statistische Analysen mbH.
- Simon, & O'Sullivan. (2012). *Projekt LCA-EE - DLR Unterauftrag Solarthermie*. Stuttgart.
- SmartGreenScans. (2012). *Life Cycle Assessment of Photovoltaic Systems*. Groet (NL): SmartGreenScans.
- Struschka, Kilgus, Sprigmann, & Baumbach. (2008). *Effiziente Bereitstellung aktueller Emissionsdaten für die Luftreinhaltung*.
- Tebert, Volz, & Töfge. (2016). *Ermittlung und Aktualisierung von Emissionsfaktoren für das nationale Emissionsinventar bezüglich kleiner und mittlerer Feuerungsanlagen der Haushalte und Kleinverbraucher*. (unveröffentlicht).
- Thuneke, K. (2013). Telefonisches Gespräch mit Klaus Thuneke (Stellvertretender Sachgebietsleiter) am 13.06.2013. Dessau.
- TI. (2016). *Calculations of gaseous and particulate emissions from German agriculture 1990 – 2015*. Braunschweig: Thünen-Report.
- TUHH. (2015). *Ökobilanz ORC-Effizienzsteigerung. (Veröffentlichung in Vorbereitung)*. TU HH Technische Universität Hamburg-Harburg.
- UBA. (2010). *Energieziel 2050: 100% Strom aus erneuerbaren Quellen*. Dessau-Rosslau: Umweltbundesamt.

- UBA. (2013a). *Potential der Windenergie an Land - Studie zur Ermittlung des bundesweiten Flächen- und Leistungspotenzials der Windenergienutzung an Land*. Dessau-Roßlau. Von https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/potenzial_der_windenergie.pdf abgerufen
- UBA. (2016). *Datenquellen und Methodik der AGEE-Stat-Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- UBA. (2017). *Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2016 - Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2015*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- UBA. (2017c). *Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2016*. Dessau-Roßlau.
- UBA, BMU, Dreher, M., Memmler, M., Rother, S., Schneider, S., & Böhme, D. (2012). *Bioenergie - Datengrundlage für die Statistik der erneuerbaren Energien und Emissionsbilanzierung - Ergebnisbericht zum Workshop vom Juli 2011*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- UBA, Memmler, M., Merkel, K., Pabst, J., Rother, S., Schneider, S., & Dreher, M. (2013). *Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger - Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2012*. Dessau-Rosslau: Umweltbundesamt. Von <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/emissionsbilanz-erneuerbarer-energietraeger-2012> abgerufen
- UBA, Memmler, M., Mohrbach, E., Schneider, S., Dreher, M., & Herbener, R. (2009). *Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger - Durch Einsatz erneuerbarer Energien vermiedene Emissionen im Jahr 2007*. Dessau-Rosslau: Umweltbundesamt. Von <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/emissionsbilanz-erneuerbarer-energietraeger-2007> abgerufen
- UBA, Memmler, M., Schrepf, L., Hermann, S., Schneider, S., Pabst, J., & Dreher, M. (2014). *Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger - Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2013*. Dessau-Rosslau: Umweltbundesamt. Von <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/emissionsbilanz-erneuerbarer-energietraeger-2013> abgerufen
- Wagner, Geiger, Hardi, Brückl, Roth, & Tzscheuschler. (2004). *CO₂-Vermeidungskosten im Kraftwerksbereich, bei den erneuerbaren Energien sowie bei nachfrageseitigen Energieeffizienzmaßnahmen*. München.
- WBGU. (2008). *Welt im Wandel: Zukunftsfähige Bioenergie und nachhaltige Landnutzung*. Berlin: WBGU - Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen.
- Ziems, Meinke, Nocke, Weber, & Hassel. (2012). *Kraftwerksbetrieb bei Einspeisung von Windparks und Photovoltaikanlagen*. Rostock.