

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

Forschungskennzahl 3715 411 16 0
UBA-FB-00 [trägt die UBA-Bibliothek ein]

Komponentenzerlegung energiebedingter Treibhausgasemissionen mit Fokus auf dem Ausbau erneuerbarer Energien

Synthesebericht:

Synthese der Komponentenzerlegung energiebedingter Treibhausgasemissionen mit Fokus auf dem Ausbau erneuerbarer Energien

von

Dr. Hannah Förster
Lukas Emele
Jakob Graichen
Charlotte Loreck
(Öko-Institut, Berlin)

Horst Fehrenbach
Nabil Abdalla
Wolfram Knörr
Susanne Köppen
(ifeu, Heidelberg)

Öko-Institut e.V.
Schicklerstrasse 5-7
10179 Berlin

ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH
Im Weiher 10
69121 Heidelberg

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

November 2018

Kurzbeschreibung

Das vorliegende Papier stellt einen Überblick über zentrale Unterschiede und Gemeinsamkeiten der Emissionsbilanz erneuerbarer Energien und dem nationalen Treibhausgasinventar dar. Diese werden zunächst qualitativ und mit Hilfe von Visualisierungen erörtert. Damit wird das Verständnis dafür geschaffen, dass die beiden Berichtswesen unterschiedlichen Zwecken dienen und wo daher Grenzen der Vergleichbarkeit liegen. Besonders hervorzuheben sind an dieser Stelle beispielsweise die unterschiedlichen geographischen Systemgrenzen. Danach wird anhand der Photovoltaik und Biogas beispielhaft quantitativ gezeigt, wie sich Unterschiede im Detail erklären lassen und wo konkret Grenzen bzw. Möglichkeiten der Harmonisierung beider Berichtswesen liegen.

Danach werden die Beiträge erneuerbarer Energien zur Emissionsreduktion in Deutschland von 1990-2015 basierend auf der Methode der Komponentenzerlegung berechnet. Damit wird folgender Herausforderung begegnet: Die steigende Anteil erneuerbarer Energien wird in einigen Bereichen nicht direkt im deutschen Treibhausgasinventar durch entsprechend zurückgehende Emissionen reflektiert. Gründe dafür sind beispielsweise gleichzeitig stattfindende Entwicklungen, die sowohl emissionssteigernd (z.B. Atomausstieg, gestiegene Stromnachfrage) als auch emissionsenkend (Zubau erneuerbarer Stromerzeugungskapazität) wirken können. In Summe können deshalb die Emissionen stagnieren oder zeitweilig steigen, obwohl der Anteil erneuerbarer Energien deutlich wächst und Emissionen vermeidet, die bei einer Nutzung anderer Technologien entstehen würden. Diese Analyse erfolgt für die Bereiche: gesamte Treibhausgasemissionen, energiebedingte CO₂-Emissionen, CO₂-Emissionen des Stroms, der Industriewärme, der Räumwärme, der Fernwärme, des motorisierten Individualverkehrs, sowie dem Straßengüterverkehr. Zum Schluss wird weiterer Forschungsbedarf skizziert.

Abstract

This paper provides an overview of key differences and similarities between the emission balance of emissions avoided by renewable energy sources and the German Greenhouse Gas Inventory. First, these are discussed qualitatively including visualizations. This creates an understanding that the two reporting systems serve different purposes and therefore only exhibit limited comparability. Particularly noteworthy at this point are, for example, the different geographical system boundaries. Using photovoltaics and biogas as examples, the paper then highlights quantitatively how differences can be explained in detail. The paper also identifies limits / possibilities for the harmonization of both reporting systems.

In the second part, the contributions of renewable energies to greenhouse gas emission reductions in Germany from 1990-2015 are calculated using decomposition analysis.

This addresses the following challenge: In some areas, the increasing share of renewable energies is not directly reflected in the German Greenhouse Gas Inventory. Reasons for this are, for example, simultaneous developments which can have both an emission-increasing effect (e.g. nuclear phase-out, increased demand for electricity) and an emission-reducing effect (expansion of renewable electricity generation capacity). Overall, greenhouse gas emissions can therefore stagnate or rise temporarily, although the share of renewable energies is growing significantly and emissions that would result from the use of other technologies are avoided. This analysis is carried out for the following areas: total greenhouse gas emissions, energy-related CO₂-emissions, CO₂-emissions from electricity, industrial heat, space heating, district heating, private road transport and road freight transport. Further research needs are outlined at the end of this report.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	7
Abkürzungsverzeichnis	8
1 Einleitung	14
2 Treibhausgasinventar und Emissionsbilanz: Überblick über Gemeinsamkeiten und Unterschiede.....	16
2.1 Qualitative Gemeinsamkeiten und Unterschiede	16
2.1.1 Zielsetzung.....	16
2.1.2 Bilanzraum und Systemgrenzen.....	17
2.1.3 Datenquellen & zeitliche Abgrenzung.....	20
2.2 Quantitative Gemeinsamkeiten und Unterschiede.....	22
2.2.1 Vorgehensweise	22
2.2.2 Grenzen der Harmonisierung am Beispiel der Photovoltaik.....	24
2.2.3 Möglichkeiten der Harmonisierung am Beispiel von Biogas.....	26
2.2.4 Fazit	29
3 Komponentenzerlegung deutscher Emissionen.....	30
3.1 Anmerkungen zur Methode.....	30
3.2 Ergebnisse	31
3.2.1 Makro-Analyse 1 – Gesamte THG-Emissionen.....	32
3.2.2 Makro-Analyse 2 – Energiebedingte CO ₂ -Emissionen	33
3.2.3 Strom.....	33
3.2.4 Industrierwärme	35
3.2.5 Raumwärme	37
3.2.6 Fernwärme	38
3.2.7 Personenstraßenverkehr.....	39
3.2.8 Straßengüterverkehr	41
4 Fazit und Zusammenfassung	43
Qualitativer Vergleich	43
Quantitativer Vergleich.....	43
Komponentenzerlegung	44
5 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf	46
6 Quellenverzeichnis.....	48
7 Annex: Datenquellen	50

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Treibhausgasemissionen in Deutschland und Anteil der erneuerbaren Energien am Primärenergieverbrauch 1990-2015	14
Abbildung 2:	Veranschaulichung der geographischen Systemgrenzen	18
Abbildung 3:	Vergleich der Bilanzierung der Emissionen und Emissionseinsparungen eines Windrads in der Emissionsbilanz (links) und in THG-Inventar (rechts)	19
Abbildung 4:	Zeitliche Zuordnung von Emissionen im THG-Inventar (links) und den Emissionsbilanzen (rechts)	21
Abbildung 5:	Einteilung der Emissionen in der Emissionsbilanz	22
Abbildung 6:	Zusammensetzung der Vorkettenemissionen am Beispiel Photovoltaik und Biogas	23
Abbildung 7	Materialspezifisches Mengengerüst in der Photovoltaik pro kW installierte Leistung	24
Abbildung 8	Materialspezifische Emissionsfaktoren je kW installierte Leistung - Photovoltaik.....	26
Abbildung 9	Emissionen und Inputs in der Strom- und Wärmeproduktion aus Biogas.....	27
Abbildung 10	Vergleich der Vorkettenemissionen in der Biogas- und Altholznutzung.....	28
Abbildung 11:	Skizze des Betrachtungsraumes entsprechend der aktuellen Emissionsanteile	31
Abbildung 12:	Komponentenzerlegung der Entwicklung der THG-Emissionen seit 1990	32
Abbildung 13:	Komponentenzerlegung der energiebedingten CO ₂ -Emissionen seit 1990	33
Abbildung 14:	Komponentenzerlegung der CO ₂ -Emissionen des Stroms seit 1990 (erneuerbare Energien zusammengefasst)	35
Abbildung 15:	Komponentenzerlegung der CO ₂ -Emissionen der Industriewärme seit 1990	36
Abbildung 16:	Komponentenzerlegung der Entwicklung der CO ₂ -Emissionen der Raumwärme seit 1990.....	37
Abbildung 17:	Komponentenzerlegung der Entwicklung der CO ₂ -Emissionen der Fernwärme seit 2003	39
Abbildung 18:	Komponentenzerlegung der Entwicklung der CO ₂ -Emissionen des motorisierten Individualverkehrs seit 1994	40
Abbildung 19:	Komponentenzerlegung der Entwicklung der CO ₂ -Emissionen des Straßengüterverkehrs seit 1991	42

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Vergleich der Zielsetzung.....	17
Tabelle 2:	Vergleich des Bilanzraums und der Systemgrenzen.....	20
Tabelle 3	Materialspezifische Berechnungsfaktoren - Photovoltaik.....	25
Tabelle 4	Vorkettenemissionen – Biogasnutzung	27
Tabelle 5:	Datenquellen für die Komponentenzerlegung	50

Abkürzungsverzeichnis

AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.
AGEE-Stat	Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BMUB	Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BRD	Bundesrepublik Deutschland
CH₄	Methan
CO₂	Kohlenstoffdioxid
CO₂-Äq.	CO ₂ -Äquivalente
CRF	Common Reporting Format, gemeinsames Berichtsformat für THG-Inventare
EC	European Commission
EE	Erneuerbare Energien
EEA	Europäische Umweltagentur
EF	Emissionsfaktor
ESD	Effort Sharing Decision; Lastenteilungsverordnung der EU
EU	Europäische Union
FKW	Fluorierte Kohlenwasserstoffe
GEMIS	Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme
GHD	Gewerbe, Handel, Dienstleistung
GWh	Gigawattstunde
HFKW	Wasserstoffhaltige Fluorkohlenwasserstoffe
Ifeu	Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH
IINAS	Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LMDI	Logarithmic Mean Divisia
LULUCF	Landwirtschaft, Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft
MIV	Motorisierter Individualverkehr (PKW, Krafträder)
MMR	Monitoring Mechanism Regulation (Verordnung EU/525/2013)
Mt	Megatonnen
MW	Megawatt
N₂O	Distickstoffoxid

NF₃	Stickstofftrifluorid
PV	Photovoltaik
SF₆	Schwefelhexafluorid
StBA	Statistisches Bundesamt
THG-Inventar	Treibhausgas-Inventar
UBA	Umweltbundesamt
ZSE	Zentrales System Emissionen

Zusammenfassung

Die Bundesrepublik Deutschland hat sich dem Ausbau erneuerbarer Energien verpflichtet. Um den Fortschritt der Marktdurchdringung der Erneuerbaren Energien zu überprüfen, muss Deutschland im Wesentlichen zwei Berichtspflichten nachkommen:

Zum einen ist dies die Erneuerbare-Energien-Richtlinie (EU 2009/28/EG, im Weiteren RED). Im Rahmen der RED wird jährlich die sog. Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger erstellt und über die durch erneuerbare Energien ausgelöste Reduktionen der Emissionen des Energiesektors (Strom, Wärme, Verkehr) berichtet. Zum anderen wird ebenfalls jährlich ein detailliertes Treibhausgas-Inventar (THG-Inventar) erstellt, welches die Emissionen der verschiedenen Sektoren kategorisiert, um die Entwicklung der THG-Emissionen zu dokumentieren. Eine explizite Emissionsvermeidung durch den Einsatz von Erneuerbaren ist nicht Teil des THG-Inventars. Grundlage hierfür ist die Verordnung EU 525/2013. Zwar haben beide Berichtspflichten denselben Hintergrund, doch müssen sie unterschiedlichen Anforderungen in Bezug auf Methodik und Bilanzraum nachkommen. Der signifikante Ausbau der Erneuerbaren spiegelt sich nicht im selben Maße im THG-Inventar wider, wie es die Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger suggeriert. Das vorliegende *F+E Vorhabens 3715 41 116 0 Komponentenzerlegung energiebedingter Treibhausgasemissionen mit Fokus auf dem Ausbau Erneuerbarer Energien* hatte zum Ziel, das Verständnis beider Berichtssysteme, ihrer Synergien und Unterschiede zu verbessern. Darüber hinaus informierte es über die Möglichkeiten einer Harmonisierung beider Berichtssysteme. Anhand der Methode der Komponentenzerlegung wurde untersucht, welchen Beitrag der vermehrte Einsatz Erneuerbarer zur THG-Minderung geleistet hat und welche die wesentlichen quantitativen Treiber der Emissionsentwicklung im Energiesektor sind.

1. Gemeinsamkeiten und Unterschiede von THG-Inventar und Emissionsbilanz

In einem ersten Schritt wurden qualitative und quantitative Unterschiede der beiden Berichtssysteme analysiert und anschaulich dargestellt: Qualitative Unterschiede gehen im Wesentlichen auf die unterschiedlichen Philosophien zurück:

- in ihrer Zielsetzung: Bericht von Emissionen nach Quellgruppenprinzip, also dort, wo Emissionen physisch in die Atmosphäre gelangen, für alle maßgeblichen Sektoren vs. Berichterstattung von Emissionsvermeidung mit zugrunde gelegtem Verursacherprinzip explizit für den Energiesektor,
- ihren jeweiligen Bilanzräumen und Systemgrenzen: Territorialansatz für das Gebiet der BRD vs. globale Betrachtung von Stoffströmen,
- sowie bezüglich der verwendeten Datenquellen und der zeitlichen Zuordnung der Emissionen: Bericht aller Emissionen im Jahr des Entstehens vs. Aufteilung über die technische Lebensdauer.

Zur Untersuchung quantitativer Unterschiede wurden die Emissionen zunächst in die Kategorien *Vorkette* (Materialbereitstellung), *Hilfsenergie* sowie *direkte Emissionen* unterteilt. Als Resultat zeigte sich, dass insbesondere für materialintensive abiotische Energieträger, deren Wertschöpfung in Teilen außerhalb Deutschlands stattfindet, deutliche Unterschiede in Höhe der berechneten Emissionen zutage treten. Als Beispiel dient hier die Stromerzeugung aus Photovoltaik (PV). Eine Harmonisierung erscheint hier aufgrund der grundlegenden Unterschiede nicht möglich. Für biogene Energieträger wie etwa Biogas, deren Wertschöpfung überwiegend in Deutschland stattfindet, bestehen jedoch durchaus Möglichkeiten der Harmonisierung, vor allem bezüglich der Datenbasis.

2. Komponentenzerlegung deutscher Emissionen

Um zu ermitteln, welche Treiber die Emissionsentwicklungen in Deutschland wie stark beeinflussen, wurde die Methodik der Komponentenzerlegung angewendet (*Logarithmic Mean Divisia Index*; LMDI). Generell dient die Komponentenzerlegung der Quantifizierung von Beiträgen wesentlicher Treiber auf die zeitliche Entwicklung einer Variablen, im vorliegenden Fall: energiebedingte THG-Emissionen. Gegenstand der Untersuchung waren hierbei neben den Treibhausgasemissionen insgesamt die folgenden

Unterkategorien: Energiebedingte CO₂-Emissionen, CO₂-Emissionen der Stromerzeugung, der Industriewärme, der Räumwärme, der Fernwärme, des Personenstraßenverkehrs, sowie des Straßengüterverkehrs.

Für die Wirkung der erneuerbaren Energien auf die energiebedingten CO₂-Emissionen, die 80 % der gesamten THG-Emissionen ausmachen, lässt sich festhalten: Von 1990 bis 2015 sanken die energiebedingten CO₂-Emissionen um knapp 25 %, das entspricht 245 Mio. t CO₂. Während es parallel auch emissionssteigernde Effekte gab (allen voran der steigende Wohlstand gemessen in BIP/Person), haben die erneuerbaren Energien mit 127 Mio. t. CO₂ zur Emissionsminderung in diesem Zeitraum beigetragen.

Im Stromsektor ist der Beitrag der erneuerbaren Energien zur Emissionsminderung besonders hoch. Zwischen 1990 und 2015 führten sie zu vermiedenen Emissionen in Höhe von 137 Mio. t CO₂. In diesem Zeitraum gab es auch emissionssteigernde Effekte wie z.B. den Anstieg des Stromverbrauchs, den starken Anstieg der Exporte und den Atomausstieg. Daher fällt die gesamte Emissionsminderung im Stromsektor insgesamt mit nur ca. 50 Mio. t CO₂ im Saldo deutlich geringer aus.

In den Wärmesektoren wirkt der Einsatz erneuerbarer Energieträger unterschiedlich über den Betrachtungszeitraum. Bei der Industriewärme, deren Emissionen von 1990 bis 2015 um 45% oder 80 Mio. t CO₂ erheblich sanken, trugen erneuerbare Energien nur mit 9 Mio.t zu dieser Minderung bei. In der Raumwärme ist eine Emissionsminderung um 32% oder 41 Mio. t CO₂ zu verzeichnen, davon wurden 16 Mio. t CO₂ durch den Einsatz erneuerbarer Energien eingespart. In diesen beiden Fällen sind es eher Effizienzsteigerungen, die zu weniger CO₂-Emissionen geführt haben. Den emissionsmindernden Treibern stehen darüber hinaus emissionssteigernde Effekte gegenüber. Insbesondere eine steigende Nachfrage hat die Emissionen nach oben getrieben.

Im dritten betrachteten Bereich der Wärmeversorgung, der Fernwärme, sind die erzielten Emissionsminderungen seit 1990 mit insgesamt nur ca. 7 Mio. t CO₂ vergleichsweise gering, dafür sind die erneuerbaren Energien mit rund 5 Mio.t relativ prominent an dieser Einsparung beteiligt.

Im Verkehrssektor ist der Einfluss der erneuerbaren Energien aktuell auf die Verwendung von Biotreibstoffen beschränkt und noch von untergeordneter Rolle. Der Emissionsminderungsbeitrag in 2015 betrug 4,9 Mio. t CO₂ für den Personenverkehr und 2,0 Mio. t CO₂ für den Straßengüterverkehr. Zukünftig könnte der Einfluss durch eine breite Markteinführung der Elektromobilität relevant werden. Die Nachfrage nach Transportdienstleistungen und verbesserte Effizienz der Fahrzeuge sind sowohl für den Personen- als auch den Güterverkehr die wichtigsten Treiber.

Summary

Germany has committed itself to the expansion of renewable energies. In order to monitor the progress of the market penetration of renewable energies, Germany has to fulfil two reporting obligations governed by the Renewable Energies Directive (EU 2009/28/EC; RED) and the Monitoring Mechanism Regulation (Regulation EU 525/2013; MMR). Within the framework of RED, the *balance of emissions avoided by renewable energy sources* is provided annually. Emission reductions caused by renewable energies in the sectors electricity, heat, transport are reported, too.

A detailed greenhouse gas inventory (GHG inventory) is also compiled annually, under the framework of the MMR. This GHG inventory reports emissions caused in Germany by sector. Explicit avoidance of emissions caused by the extension of renewable energy sources, however, is not part of the GHG inventory.

Although both reporting obligations have a similar background, they have to meet different requirements with regard to methodology and system boundaries. This leads to the fact that the expansion of renewable energy sources is not reflected in the GHG inventory to the same extent as the *balance of emissions avoided by renewable energy sources* suggests.

The present project therefore generated a better understanding of both reporting systems, their similarities and differences. In addition, it provided information on the possibilities of harmonising both. As a last step, a decomposition analysis was used to quantify the amount of emission reductions triggered by the increased use of renewable energy sources by sector which is invisible in the GHG inventory.

1. similarities and differences between GHG inventory and balance of emissions avoided by renewable energy sources

In a first step of the project, qualitative and quantitative differences between the two reporting systems were analysed and graphically presented. The qualitative differences are essentially the result of different philosophies of the two products:

- their objective: Reporting of emissions according to the source group approach, i.e. according to where emissions physically enter the atmosphere, for all sectors vs. reporting of avoided emissions including global material flows, explicitly for the energy sector;
- their system boundaries: Territorial approach for the territory of Germany vs. global consideration of material flows; and
- the data sources and the allocation of emissions over time: Reporting of all emissions in the year of origin vs. allocation of emissions over the technical lifetime.

To investigate quantitative differences, the emissions were first divided into the categories material supply, auxiliary energy and direct emissions. The study found that especially for material-intensive abiotic energy sources whose value creation takes place partly outside of Germany, clear differences in the amount of the calculated emissions become apparent. An example is electricity generation from photovoltaics (PV). In this case, a harmonisation across the reporting requirements does not appear possible due to the fundamental differences. For biogenic energy sources such as biogas whose value creation takes place predominantly in Germany, there are possibilities for harmonisation, especially with regard to the data sources used.

2. Decomposition analysis of German emissions

A decomposition analysis (in this case Logarithmic Mean Divisia Index; LMDI) was applied to determine which drivers influence emission trends in Germany and to what extent.

In general, decomposition analysis serves to quantify the contribution of major drivers to the temporal development of a variable. In this study energy-related emissions in Germany were subject to the decomposition analysis. The following sectors were investigated: Energy-related CO₂ emissions, CO₂ emissions from electricity generation, industrial heat, space heating, district heating, passenger road transport and road freight transport.

The impact of renewable energies on energy-related CO₂ emissions, which account for 80 % of total German GHG emissions, is significant: In the period 1990 to 2015, energy-related CO₂ emissions fell by almost 25%, corresponding to 245 million tons (Mio. t) of CO₂. While there were developments that increased emissions (above all affluence, measured in GDP/capita), renewable energies contributed to emission reductions of 127 Mio. t CO₂.

In the electricity sector, the contribution of renewable energies to reducing emissions is particularly high. Between 1990 and 2015 renewable energy sources contributed to avoiding a total of 137 Mio. t CO₂. During this period, there were also emission-increasing effects such as the increase in electricity consumption, the sharp rise in electricity exports and the phase-out of nuclear power. As a result, the overall reduction of CO₂ emissions in the electricity sector is lower, with only about 50 Mio. t of CO₂ in total.

In the heating sectors, the use of renewable energy sources has different effects over the analysed period. In the case of industrial heat, whose emissions fell considerably by 45% or 80 Mio. t CO₂ between 1990 and 2015, renewable energies contributed only 9 Mio. t CO₂ to this reduction. In space heating, emissions were reduced by 32% or 41 Mio. t CO₂, of which 16 Mio. t were avoided through the use of renewable energies. In these two sectors energy efficiency increases are the most prominent driver of reducing CO₂ emissions. In addition, the emission-reducing drivers are partially offset by emission-increasing effects, especially rising demand.

In district heating, the third area of heat supply under consideration, the reductions in emissions achieved since 1990 are comparatively low at only about 7 Mio. t CO₂ in total, but renewable energies contributed to saving around 5 Mio. t CO₂.

In the transport sector, the influence of renewable energies is currently limited to the use of biofuels and still of secondary importance. The emission reduction contribution in 2015 was 4.9 Mio. t CO₂ for passenger transport and 2.0 Mio. t CO₂ for road freight transport. In the future, the influence of renewable energy could become relevant through a broad market launch of electric mobility. The demand for transport services and improved vehicle efficiency are the most important drivers for both passenger and freight transport.

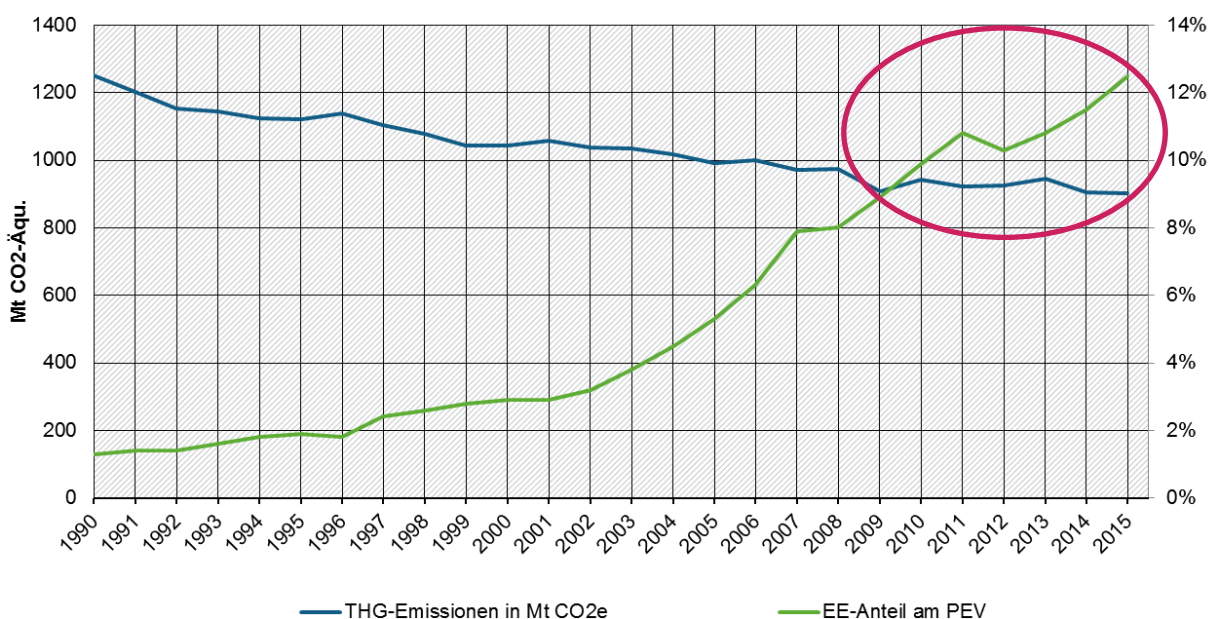
1 Einleitung

Der Ausbau erneuerbarer Energien hat Einfluss auf verschiedene Berichtspflichten, denen Deutschland unterliegt. **Bezüglich erneuerbarer Energien** gilt eine Berichtspflicht nach der Erneuerbaren Energien-Richtlinie (Richtlinie 2009/28/EG; EU 2009a). Hierzu wird vom Umweltbundesamt (UBA) jährlich eine sogenannte Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger (UBA 2017a) erstellt. Diese beinhaltet Informationen zu vermiedenen Treibhausgasemissionen durch den Ausbau erneuerbarer Energien. **Zur Überprüfung der Senkung von Treibhausgasemissionen** muss im Rahmen der Verordnung (EU) 525/2013 (EU 2013) jährlich ein detailliertes sogenanntes Treibhausgasinventar (THG-Inventar) erstellt werden, welches im Nationalen Inventarbericht (NIR) erläutert wird (siehe z.B. UBA 2017b). Das THG-Inventar berichtet auf detailliertem sektorialem Niveau die Treibhausgasemissionen, die jährlich ab 1990 bis zum vorletzten Jahr in Deutschland angefallen sind.

Beide Berichtspflichten dienen dem Monitoring im Bereich des Klimaschutzes. Allerdings müssen sie unterschiedlichen Anforderungen genügen, das gilt insbesondere für den Bilanzraum und die Berechnungsmethodik.

Aus diesem Grund tritt folgende Herausforderung zu Tage: In der Emissionsbilanz werden die aufgrund der Nutzung von erneuerbaren Energien vermiedenen Emissionen berichtet. Im THG-Inventar werden im Gegensatz dazu Emissionen berichtet, vermiedene Emissionen sind nicht direkt erkennbar. Abbildung 1 zeigt diese Situation: Trotz eines deutlichen Ausbaus der erneuerbaren Energien seit 2010 sind die THG-Emissionen kaum gesunken.

Abbildung 1: Treibhausgasemissionen in Deutschland und Anteil der erneuerbaren Energien am Primärenergieverbrauch 1990-2015



Quelle: eigene Darstellung basierend auf CRF-Tabellen (UBA 2017b) und AGEBAuswertungstabellen (AGEB 2016a)

Ziel des vorliegenden *F+E Vorhabens 3715 41 116 0 Komponentenzerlegung energiebedingter Treibhausgasemissionen mit Fokus auf dem Ausbau Erneuerbarer Energien* ist es daher, durch eine Analyse beider Berichtswesen ein verbessertes Verständnis für die Gemeinsamkeiten und Gegensätze zu schaffen. Darüber hinaus werden Möglichkeiten der Harmonisierung beider Formate untersucht.

Um in einem nächsten Schritt die Frage zu beantworten, wie stark die erneuerbaren Energien zur Minderung der Treibhausgasemissionen beigetragen haben, wird die Methode der Komponentenzerlegung verwendet. Damit werden auf Basis öffentlich verfügbarer Daten die entscheidenden Treiber der Emissionsentwicklung quantifiziert. So werden sowohl der emissionsmindernde Beitrag der erneuerbaren Energien als auch die emissionssteigernden oder emissionsmindernden Effekte anderer Treiber messbar. Der Beitrag der erneuerbaren Energien kann so in einem Gesamtkontext der Emissionsentwicklung abgebildet werden. Die Komponentenzerlegung wird für verschiedene Bezugsräume durchgeführt, insbesondere für die Energiesektoren Strom, Wärme und Verkehr in verschiedenen Abgrenzungen.

Das vorliegende Papier stellt eine Synthese der im Rahmen des Projektes gewonnenen Erkenntnisse dar und ist wie folgt aufgebaut:

Im Abschnitt 2.1 werden qualitative Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen der Emissionsbilanz und dem THG-Inventar übersichtlich zusammengefasst. Eine detailliertere Aufstellung kann dem Bericht 1 dieses Projektes entnommen werden. Im Abschnitt 2.2 erfolgt exemplarisch eine Herausarbeitung quantitativer Unterschiede zwischen beiden Berichtsformaten für die Beispiele Photovoltaik (PV) und biogene Energieträger. Weitere Informationen zu quantitativen Unterschieden und Gemeinsamkeiten können dem Bericht 2 des Projektes entnommen werden.

Um den Einfluss der erneuerbaren Energien auf die Emissionsentwicklung zu zeigen, werden in Kapitel 3 die Ergebnisse der Komponentenzerlegung veranschaulicht. Dort ist auch dargestellt, warum trotz des Ausbaus der erneuerbaren Energien die THG-Emissionen nicht entsprechend sinken. Weitere Informationen finden sich im Bericht 3.

Abschließend werden die Erkenntnisse kurz zusammengefasst und weiterer Forschungsbedarf identifiziert.

2 Treibhausgasinventar und Emissionsbilanz: Überblick über Gemeinsamkeiten und Unterschiede

Im Folgenden werden die zentralen Gemeinsamkeiten und Unterschiede des Treibhausgasinventars sowie der Emissionsbilanz vorgestellt. Dazu erfolgt zunächst ein qualitativer Vergleich der Methoden und Bilanzräume. Der quantitative Vergleich erfolgt anhand zweier Beispiele – Photovoltaik und Biogasnutzung.

2.1 Qualitative Gemeinsamkeiten und Unterschiede

Die Gemeinsamkeiten und Unterschiede der beiden oben genannten Berichtssysteme lassen sich im Wesentlichen in drei verschiedene Kategorien einteilen:

1. Zielsetzung
2. Bilanzraum und Systemgrenzen
3. Datenquellen

Im Folgenden werden wesentliche Gemeinsamkeiten und Unterschiede innerhalb dieser Kategorien kurz beschrieben. Für weitere Details siehe Bericht 1 zu diesem Projekt.

2.1.1 Zielsetzung

Die wesentlichen Unterschiede beider Berichtswesen liegen in ihrer jeweiligen Zielsetzung:

Treibhausgasinventare haben zum Ziel, ein vollständiges Inventar aller THG-Emissionen im Gebiet der Bundesrepublik Deutschland zu erstellen. Emissionen außerhalb Deutschlands werden nicht berücksichtigt (Territorialprinzip). Die Bilanzierung selbst erfolgt nach dem Quellenprinzip: Treibhausgasemissionen werden jeweils dem Sektor zugeordnet, in dem sie physisch in die Atmosphäre entweichen. Das deutsche Treibhausgasinventar bildet also neben dem Sektor Energie ebenfalls die Treibhausgasemissionen aller anderen Sektoren wie z.B. der Landwirtschaft und der chemischen Industrie ab.

Rechtliche Grundlagen des Treibhausgasinventars sind sowohl das Kyoto-Protokoll auf internationaler Ebene als auch die Verordnung EU/525/2013 (EU 2013; kurz MMR) auf europäischer Ebene. Diese adressieren Staaten als relevante Akteure. Daher sind sowohl zur Information als auch zur Feststellung der Zielerreichung im Rahmen des Kyoto-Protokolls als auch der EU-internen Ziele unter der der Effort Sharing Decision (EU 2009b) Erhebungen der von einzelnen Staaten auf ihrem Hoheitsgebiet ausgehenden Treibhausgasemissionen notwendig.

Das Ziel der „Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger“ (kurz Emissionsbilanz) besteht hingegen in der quantitativen Erfassung der vermiedenen Emissionen durch den Einsatz erneuerbarer Energieträger anstelle konventioneller (fossiler) Energieträger in den Sektoren Strom, Wärme und Verkehr. Die Ergebnisse stellen somit die durch in Deutschland eingesetzte erneuerbare Energien vermiedenen THG-Emissionen dar. Sie fließen unter anderem in die Publikation „Erneuerbare Energien in Zahlen“ (BMWi 2016) ein und bilden die Grundlage für den deutschen Fortschrittsbericht im Rahmen der Erneuerbaren Energien Richtlinie (BRD 2016).¹

Im Gegensatz zur Emissionsbilanz wird eine Emissionsvermeidung oder -reduktion im THG-Inventar nicht explizit ausgewiesen. Sie zeigt sich lediglich durch einen niedrigeren Gesamtausstoß von Emissionen.

¹ Für die die Fortschrittsberichte aller Mitgliedsstaaten siehe EC (2016).

Die Tabelle 1 fasst die wesentlichen Elemente hinsichtlich der Zielsetzung der beiden Berichterstattungen zusammen.

Tabelle 1: Vergleich der Zielsetzung

	THG-Inventar	Emissionsbilanz
Zielsetzung/ Fragestellungen	Vollständiges Inventar aller THG - Emissionen im direkten Wirkungsbereich; Überprüfung der Zielerreichung im Kyoto-Protokoll und der Effort Sharing Decision.	Qualitative und quantitative Bilanzierung der Freisetzung bzw. Einsparung relevanter THGs und Luftschadstoffe durch den Einsatz erneuerbarer Energien bzw. Substitution fossiler Energieträger [Nettoemissions-einsparung]
Produkt/ Ergebnis	Nationaler Inventarbericht zum Treibhausgasinventar; Tabellen im gemeinsamen Berichtsformat (CRF); Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen. ²	Gesamtbilanz der verursachten Emissionen, der brutto vermiedenen Emissionen und der netto vermiedenen Emissionen nach erneuerbarem Energieträger in den Sektoren Strom, Wärme und Verkehr
Methoden	2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.	Keine Vorgabe

Quelle: eigene Darstellung

2.1.2 Bilanzraum und Systemgrenzen

Das THG-Inventar folgt einer Quellgruppen-Logik mit Territorialansatz, während die Emissionsbilanz dem Verursacherprinzip folgt.

Die Quellgruppen-Logik bedeutet, dass Emissionen nach dem „Schornstein-Prinzip“ denjenigen Sektoren zugeordnet werden, in dem sie physisch in die Atmosphäre gelangen, unabhängig des jeweiligen Verwendungszweckes.

Unter Verursacherprinzip hingegen versteht man die Zuordnung sämtlicher Emissionen entlang des Lebensweges eines Energieträgers (Rohstoffabbau und Aufbereitung, Anlagenbau, Transportvorgänge, Betrieb, Verwertung) zu dem finalen Produkt/Nutzer. So wird einer Kilowattstunde elektrischer Energie aus einer Windkraftanlage ein Anteil der Emissionen, die bei der Herstellung der Windkraftanlage entstanden sind, zugeordnet. Die Emissionszuordnung folgt hier also dem jeweiligen Verwendungszweck. Hier werden auch Emissionen, die im Ausland entstehen, mit berücksichtigt.

Die Berechnung der **Treibhausgasemissionen für das Treibhausgasinventar** erfolgt entsprechend den „2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas inventories“ (IPCC 2006) i.d.R. für jeden Sektor und jedes Treibhausgas und jedes Jahr nach immer dem gleichen Schema:

$$\text{Emission} = \text{Aktivitätsrate} \times \text{Emissionsfaktor}$$

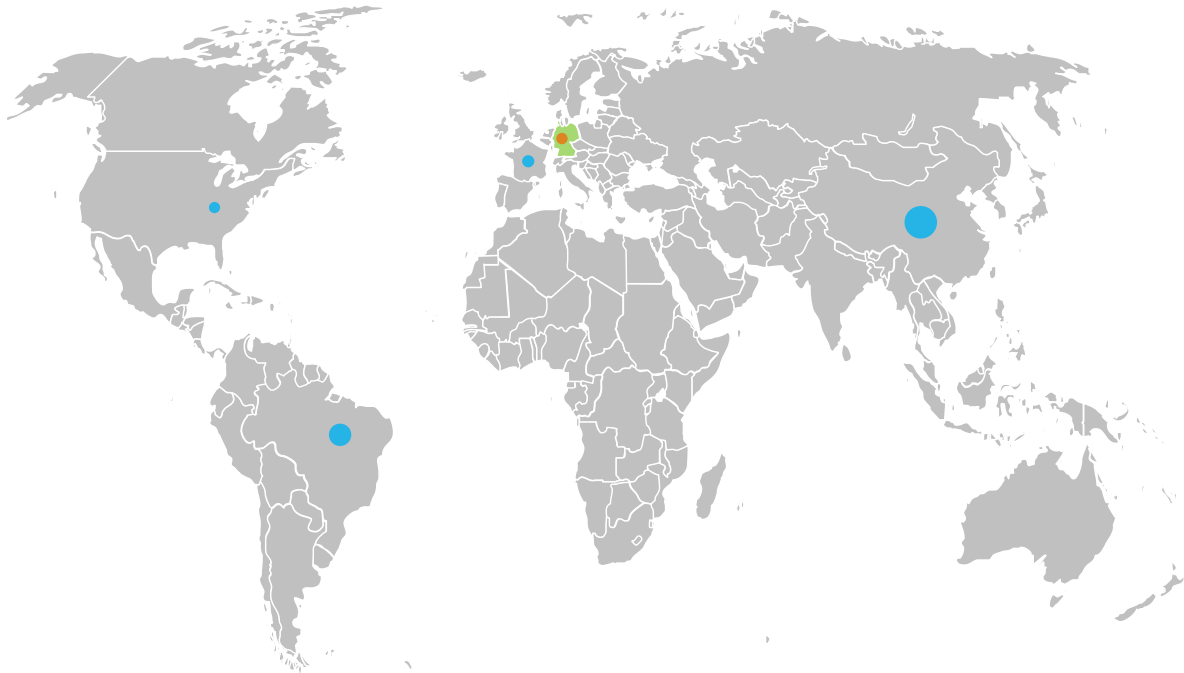
Dabei ist die Aktivitätsrate z.B. der Brennstoffeinsatz im jeweiligen Sektor, die Emissionen werden durch die Multiplikation mit einem brennstoffspezifischen Emissionsfaktor berechnet.

Die **Emissionsbilanzen** hingegen versuchen, zu einzelnen Energieträgern die zugehörigen Emissionen des gesamten Lebenszyklus zu ermitteln. Dabei werden alle zugehörigen Emissionen erfasst, auch wenn

² Die Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen unterliegen keiner internationalen Berichtspflicht, sind aber dennoch ein Produkt des Treibhausgasinventars.

sie entlang vorgelagerter Aktivitäten (Vorketten) oder in anderen Sektoren und/oder Ländern anfallen. Abbildung 2 veranschaulicht die geografischen Systemgrenzen beider Systematiken.

Abbildung 2: Veranschaulichung der geographischen Systemgrenzen



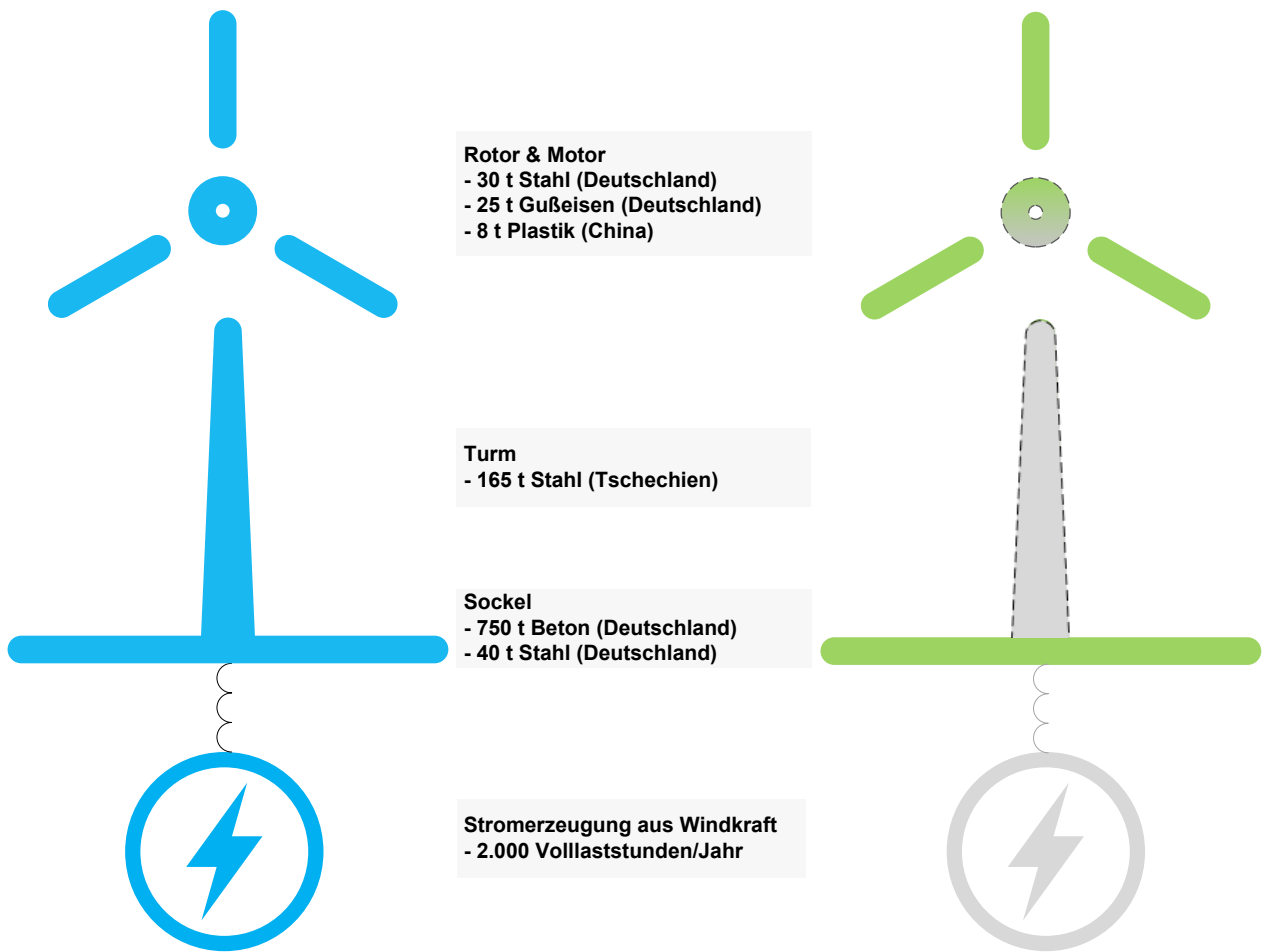
Im Inventar berücksichtigt: territorial anfallende Emissionen
In Emissionsbilanz berücksichtigt: Vorkettenemissionen der Herstellung aus dem Ausland, anteilig auf die Lebensdauer verteilt.
In Inventar & Emissionsbilanz berücksichtigt: inländische Vorketten

Quelle: eigene Darstellung

Die oben umrissenen methodischen Unterschiede haben für die Bewertung einzelner Energieträger eine Reihe von praktischen Auswirkungen. Diese sollen anhand eines stark vereinfachten Beispiels der Stromerzeugung durch ein Windrad quantifiziert und visualisiert werden. Abbildung 3 veranschaulicht am Beispiel einer Onshore-Windkraftanlage die unterschiedlichen Ansätze in der Bilanzierung im THG-Inventar (linke Seite) und Emissionsbilanz (rechte Seite).

Die hypothetische Windkraftanlage wurde für das Beispiel zu Teilen in Deutschland, China und Tschechien produziert. Der Materialeinsatz bezieht sich auf eine 2-MW Anlage, als Lebensdauer werden 20 Jahre veranschlagt. Die im Inventar berichteten inländischen Emissionen aus der Herstellung des Windrads (der Sockel sowie Teile des Rotors und des Motors) werden im Jahr ihrer Entstehung berichtet. In der Energiebilanz werden diese auf die angenommene Lebensdauer von 20 Jahren umgelegt. Die ausländischen Vorkettenemissionen, die für die Bilanz auch über die Lebenszeit des Windrads umgelegt werden, und die vermiedenen Emissionen werden im THG-Inventar nicht berechnet. Die vermiedenen Emissionen werden implizit in den Gesamtemissionen aus der Stromerzeugung erfasst, aber nicht einzeln quantifiziert. Die ausländischen Vorkettenemissionen sind gar nicht im deutschen Inventar enthalten, sondern müssten in dem Beispiel von China und Tschechien berichtet werden.

Abbildung 3: Vergleich der Bilanzierung der Emissionen und Emissionseinsparungen eines Windrads in der Emissionsbilanz (links) und in THG-Inventar (rechts)



Quelle: Eigene Darstellung mit Daten von Karl R. Haapala und Preedanood Prempreeda (2014), ForWind und Öko-Institut e.V. (2016) sowie Visualisierung des Noun Project (Yorlmar Campos (Windrad) und Hea Poh Lin (Strom))
 Anmerkungen: In der Emissionsbilanz (blau) sind alle Emissionen aus der Herstellung des Windrads berücksichtigt. Die grauen Teile des Windrads werden im deutschen THG-Inventar (grün) nicht explizit berücksichtigt. Die Emissionen aus der Herstellung im Ausland werden in den Inventaren der jeweiligen Länder erfasst. Die produzierte Menge Strom beeinflusst die Emissionen aus der Stromproduktion, die vermiedenen Emissionen werden aber nicht für das Inventar quantifiziert.

Tabelle 2 stellt tabellarisch die Unterschiede und Gemeinsamkeiten bezüglich Bilanzraum und Systemgrenzen dar.

Tabelle 2: Vergleich des Bilanzraums und der Systemgrenzen

	THG-Inventar	Emissionsbilanz
Geographische Systemgrenzen	Territorial- und Quellgruppenprinzip	dem Verursacherprinzip folgend bis zu Rohstoffherkunftsländern
Berücksichtigte Gase	Kohlenstoffdioxid (CO ₂); Methan (CH ₄); Lachgas (N ₂ O); Wasserstoffhaltige Fluorkohlenwasserstoffe (HFKW); Fluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW); Schwefelhexafluorid (SF ₆); Stickstofftrifluorid (NF ₃).	Verpflichtend: Kohlenstoffdioxid, Methan, Lachgas. F-Gase werden teilw. in den Vorketten ermittelt und in CO ₂ -äq. berücksichtigt. Freiwillig: Schwefeldioxid, Stickstoffoxide, Staub, Kohlenstoffmonoxid, flüchtige organ. Verbindungen (o. Methan)
Berücksichtigung Vorketten-emissionen	In der jeweiligen Quellgruppe werden jeweils nur die direkten Emissionen im Inland berücksichtigt. Vorkettenemissionen der Produktion von Energieträgern, sofern diese Vorkettenemissionen innerhalb des geographischen Bilanzraums (Territorium) entstehen.	Vorkettenemissionen zur Bereitstellung fossiler und biogener Energieträger, ggf. der nötigen Hilfsenergie, sowie der vorgeschalteten Prozessketten des gesamten Lebenszyklus außer Entsorgung der Anlagen und der dafür notwendigen Rohstoffe

Quelle: eigene Darstellung

2.1.3 Datenquellen & zeitliche Abgrenzung

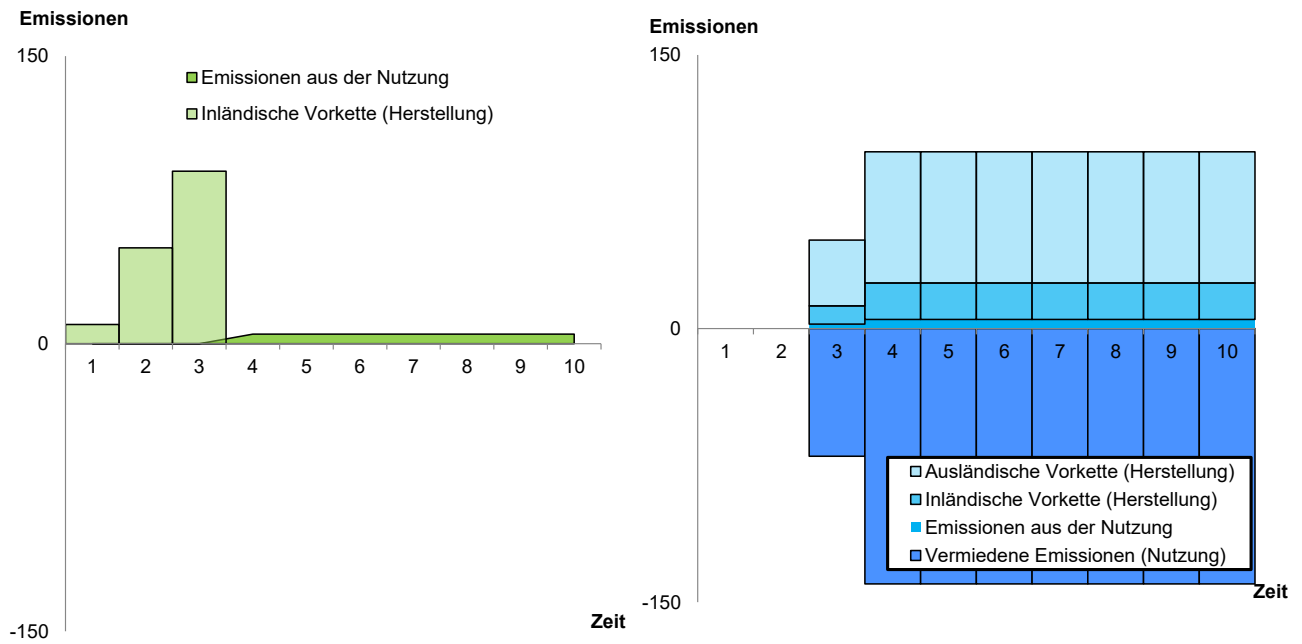
Neben den grundlegenden Unterschieden hinsichtlich der Systemgrenzen und der Emissionszuordnung gibt es weitere methodische Unterschiede zwischen Treibhausgasinventar und Emissionsbilanz. Maßgebliche Abweichungen der beiden Berichtssysteme treten hinsichtlich der verwendeten Datenquellen sowie der zeitlichen Zuordnung der Emissionen auf.

So basiert das THG-Inventar für den Energiebereich im Wesentlichen auf Daten der deutschen Energiebilanz, um den Energieträgereinsatz in den jeweiligen Sektoren abzubilden (AGEB 2016b). Weitere Datenquellen und Schätzungen für die Energieverbräuche in den verschiedenen Sektoren, Verbandsstatistiken und Modelle werden als zusätzliche wesentliche Datenquellen herangezogen und gehen in das Zentrale System Emissionen (ZSE) ein.

In der Emissionsbilanz hingegen werden im Wesentlichen Daten zur (erneuerbaren) Energieerzeugung der Sektoren Strom, Wärme und Verkehr der AGEE-Stat ausgewertet (AGEE-Stat 2017). Zur Berechnung der Emissionseinsparungen bedarf es darüber hinaus Daten zu den jeweiligen Emissionsfaktoren der Energieträger, also der Menge an klimarelevanten Emissionen (umgerechnet in CO₂-Äquivalente), die pro einer spezifischen Menge an Arbeit bzw. Energie (i.d.R. kWh) freigesetzt werden. Diese werden zum einen verschiedenen Ökobilanz-Datenbanken (Centre for Life Cycle Inventories 2016; IINAS 2013), Gutachten und Studien (Kunze & Fehrenbach 2011) entnommen. Zum anderen wird, vor allem für die fossilen Energieträger, das Zentrale System Emissionen (ZSE) genutzt (UBA 2016b).

Die zeitliche Zuordnung der anfallenden Emissionen wird ebenfalls unterschiedlich gehandhabt. Das THG-Inventar ist dabei an Vorgaben der IPCC-Guidelines gebunden, welche vorschreiben, dass Emissionen vollständig in dem Jahr berichtet werden müssen, in dem sie anfallen. Dies gilt im Falle der Berichterstattung der Emissionsbilanz lediglich für direkte Emissionen, etwa bei der Verbrennung von Biomasse und Emissionen, die durch den Bezug von Hilfsenergie entstehen. Im Gegensatz dazu werden die Vorkettenemissionen auf die gesamte technische Lebensdauer einer Anlage umgelegt. Abbildung 4 veranschaulicht die unterschiedliche Berücksichtigung der zeitlichen Dimension.

Abbildung 4: Zeitliche Zuordnung von Emissionen im THG-Inventar (links) und den Emissionsbilanzen (rechts)



Quelle: Eigene Darstellung

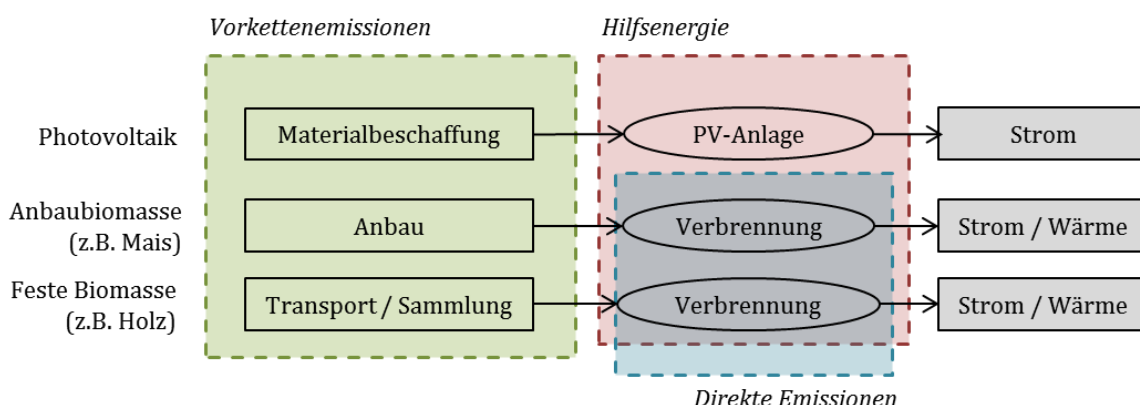
2.2 Quantitative Gemeinsamkeiten und Unterschiede

2.2.1 Vorgehensweise

Für den quantitativen Vergleich des THG-Inventars mit der Emissionsbilanz wurde angestrebt, für einzelne Energieträger die Emissionen mit Hilfe des THG-Inventars so zu berechnen, wie sie auch in der Emissionsbilanz berechnet wurden. Dafür ist zunächst wichtig zu wissen, dass in der Emissionsbilanz die Emissionen in drei Kategorien unterteilt werden (s. Abbildung 5)

- **Vorkettenemissionen:** Die Vorkettenemissionen entstehen bei der Herstellung des Energieträgers. Darunter fallen z.B. Emissionen für die Düngerherstellung im Anbau von Energiepflanzen oder für die Herstellung des Materials für Windkraftanlagen.
- **Hilfsenergie:** Hilfsenergie ist Strom, der in den Energie-Anlagen selbst eingesetzt wird. So benötigen beispielsweise Biogasanlagen Strom für Pumpen und Rühranlagen.
- **Direkte Emissionen:** Die direkten Emissionen, also Emissionen, die bei Verbrennung entstehen, fallen lediglich bei biogenen Energieträgern an. Finden keinerlei Verbrennungsvorgänge statt, wie im Falle der Windkraft oder der Photovoltaik, so fallen pauschal keine direkten Emissionen an.

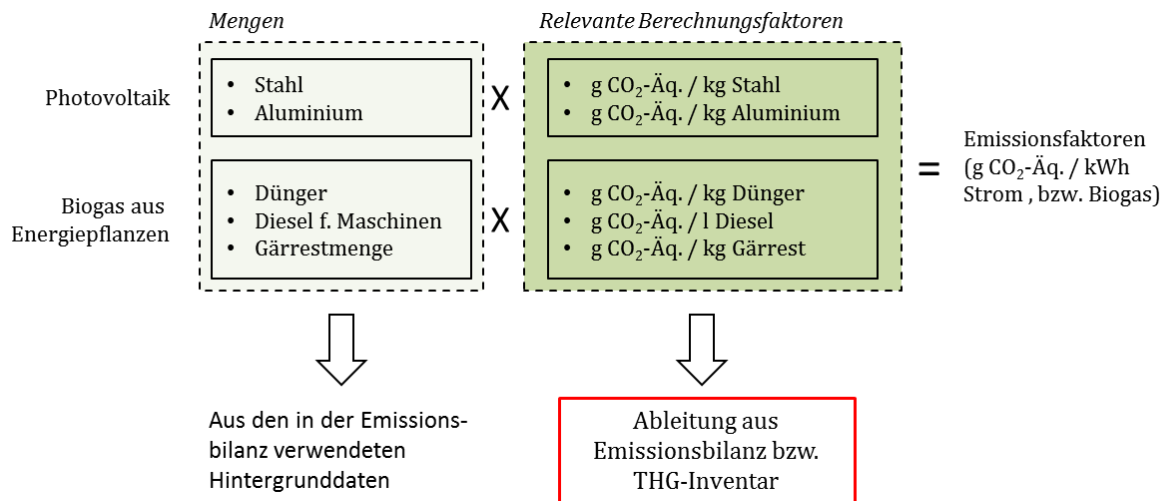
Abbildung 5: Einteilung der Emissionen in der Emissionsbilanz



Quelle: eigene Darstellung

Der nun folgende Vergleich konzentriert sich auf die Vorkettenemissionen, da diese am komplexesten sind. Sie werden berechnet als Produkt aus den Mengen der eingesetzten Materialien sowie der spezifischen Berechnungsfaktoren (s. Abbildung 6). Der quantitative Vergleich findet also streng genommen auf Basis der jeweils angewendeten Berechnungsfaktoren statt. Diese können aus der Emissionsbilanz direkt abgelesen werden, während sie im THG-Inventar aus den dort berichteten Emissionen abgeleitet werden müssen. Die Emissionen im THG-Inventar werden aufgrund des Quellgruppenprinzips an unterschiedlichen Stellen berichtet. Für Energie aus Biogas werden beispielsweise im THG-Inventar die Emissionen aus der Düngerherstellung dem Industriesektor zugeordnet, die Dieselemissionen landwirtschaftlicher Maschinen dem Energiesektor (1.A.4.cii) und Lachgas-Emissionen aus der Düngerausbringung dem Landwirtschaftssektor.

Abbildung 6: Zusammensetzung der Vorkettenemissionen am Beispiel Photovoltaik und Biogas

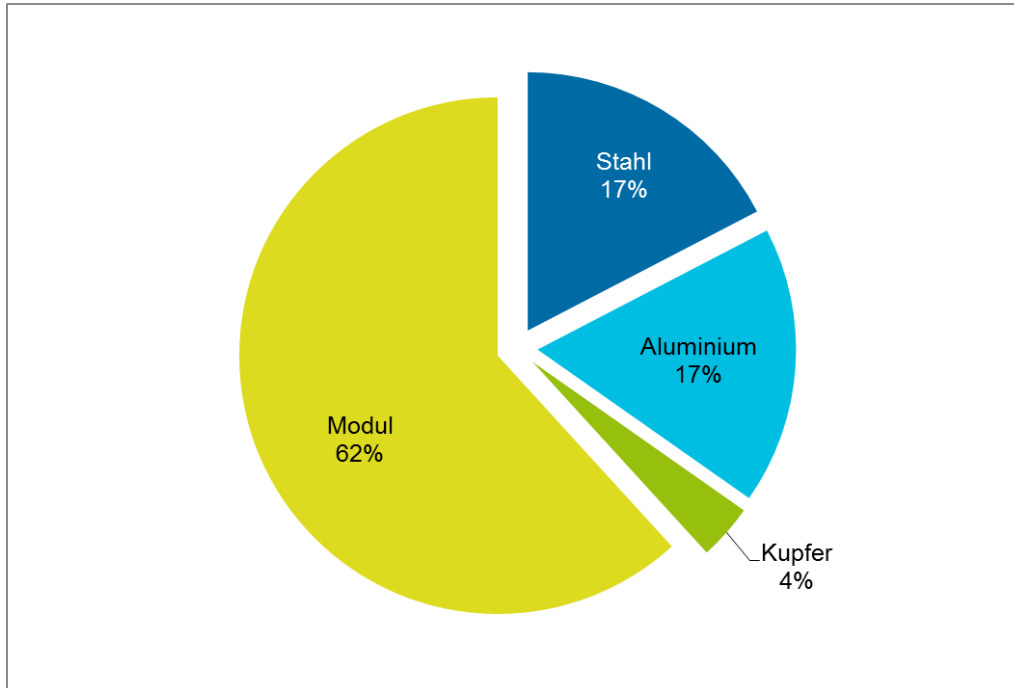


Quelle: eigene Darstellung

2.2.2 Grenzen der Harmonisierung am Beispiel der Photovoltaik

Die Bilanzierung von Emissionen aus der Stromerzeugung mittels Photovoltaik wird – aufgrund des emissionslosen Betriebes – maßgeblich von den Vorkettenemissionen bestimmt. Diese wiederum gehen im Wesentlichen auf die Materialbereitstellung zurück (UBA 2017a). Die berücksichtigten Hauptmaterialien und deren Anteile je kW installierte Leistung können Abbildung 7 entnommen werden.

Abbildung 7 Materialspezifisches Mengengerüst in der Photovoltaik pro kW installierte Leistung



Quelle: eigene Darstellung nach IINAS (2013)

Mit rund 60 % entfällt ein Großteil auf das Modulmaterial³. Die Produktion der Module findet zum überwiegenden Teil im asiatischen Raum und nicht in Deutschland statt (Fraunhofer ISE 2018). Infolgedessen sind energiebedingte Emissionen aus der Herstellung von PV-Modulen im THG-Inventar als solche nicht ausgewiesen⁴. Erschwerend für einen Vergleich kommt hinzu, dass die Produktion von PV-Modulen sehr energieintensiv und somit entscheidend für die Emissionen der PV-Stromerzeugung ist (ca. 80 % der Gesamtemissionen). In Tabelle 3 werden die materialspezifischen Berechnungsfaktoren vergleichend gegenübergestellt.

Während für das Material Stahl beide Berichtssysteme zu einem gleichen Berechnungsfaktor von rund 1,4 kg CO₂-Äq./ kg kommen, gibt es für Aluminium deutliche Abweichungen. Ausschlaggebend dafür sind zum einen die Bereitstellung von Aluminiumoxid, dem Ausgangsstoff für Aluminium, im Ausland. Zum anderen ist die energieintensive Reduktion von Aluminiumoxid zu elementarem Aluminium mittels Schmelzflusselektrolyse relevant. Der veranschlagte Strom und die damit einhergehenden Emissionen werden im THG-Inventar in Hauptquellgruppe 1⁵ kumuliert berichtet, sodass eine dezidierte Ausweisung des Anteils, der auf die Aluminiumproduktion zurückzuführen ist, nicht möglich ist. Die im

³ In der Emissionsbilanz werden repräsentativ polykristalline PV-Zellen analysiert.

⁴ Zwar werden Emissionen aus der Herstellung von PV-Modulen in der Quellgruppe 2.E.3 berichtet. Jedoch beschränken sich diese auf den Einsatz von SF₆ und NF₃, welche in ihrer Höhe vernachlässigbar sind.

⁵ Unter Hauptquellgruppe versteht man Quell- und Senkengruppen, die einen signifikanten Einfluss auf die Gesamtemissionen direkter Treibhausgase haben und somit eine bedeutende Rolle spielen.

THG-Inventar gelisteten Emissionen der Aluminiumindustrie beziehen sich im Wesentlichen auf den Abbrand von kohlenstoffbasierten Anoden.

Die Emissionen aus der Kupferherstellung werden neben dem Bergbau ebenfalls maßgeblich von der Prozessfeuerung bestimmt. Auch diese wird kumuliert mit anderen Nichteisenmetallen in Quellgruppe 1.A.2.b berichtet, sodass eine Zuordnung von Emissionen zum Produkt Kupfer im THG-Inventar ebenfalls nicht möglich ist (UBA 2016a).

Tabelle 3 Materialspezifische Berechnungsfaktoren - Photovoltaik

Material	Emissionsbilanz					Analogie im THG-Inventar ⁶				
	Stahl	Aluminium	Kupfer	Modul	Summe	Stahl	Aluminium	Kupfer	Modul	Summe
[kg CO ₂ -Äq./ kW]	20,6	262,5	10,7	1050	1348	21,2	26,0	n.a.*	n.a.*	47,2
[kg CO ₂ -Äq./ kg]	1,4	17,5	3,6	19,7	⁻⁷	1,4	1,7	n.a.*	n.a.*	⁻⁷

*n.a.: Nicht ausweisbar

Quelle: Eigene Berechnung nach IINAS (2013) und UBA (2016b)

Zusammenfassend ergibt sich für die Emissionen aus der Photovoltaik in Emissionsbilanz und THG-Inventar das folgende Bild (Abbildung 8), das die oben beschriebenen Unterschiede verdeutlicht.

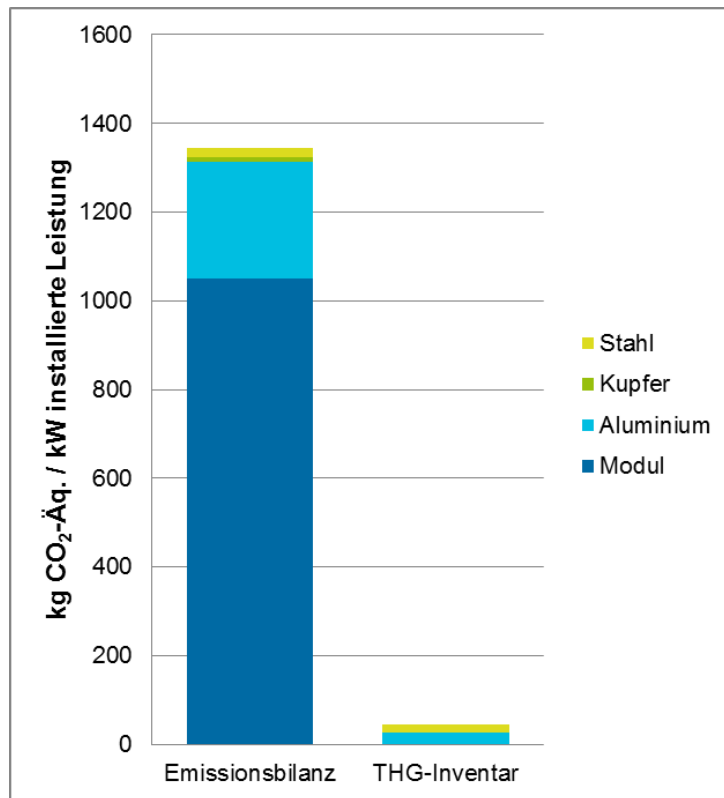
Es lässt sich nur ein sehr kleiner Teil des Emissionsfaktors für die Photovoltaik aus dem THG-Inventar ableiten. Da dies im Wesentlichen auf methodische Aspekte und weniger auf eine unterschiedliche Datenbasis zurückzuführen ist, sind die Möglichkeiten einer Harmonisierung stark eingeschränkt.

Eine Harmonisierung beider Berichtssysteme für Energieträger mit dominierenden Vorkettenemissionen sowie maßgeblicher ausländischer Wertschöpfung wie beim Beispiel Photovoltaik erscheint folglich nur sehr eingeschränkt möglich.

⁶ Zum Verständnis sei auf den Bericht 2 verwiesen, der die Herleitung detailliert erklärt – kurz gefasst gilt: Für die Herleitung der Emissionsfaktoren aus dem THG-Inventar wurde dieselbe benötigte Menge eines Materials pro kW installierter Leistung angesetzt wie für die Emissionsbilanz erneuerbarer Energien. Darauf aufbauend wurde ein Gesamtmaterialbedarf berechnet, welcher sich aus Multiplikation der neu installierten Leistung im Bezugsjahr 2015 mit den spezifischen Mengen pro kW installierter Leistung des jeweiligen Energieträgers ergab. Dieser Gesamtmaterialbedarf wurde anschließend mit dem materialspezifischen Emissionsfaktor, der zur Produktion des Stoffes nötig ist, multipliziert. Der Emissionsfaktor setzt sich aus direkten Prozessemissionen und prozessbegleitenden Emissionen, die mit dem Herstellungsprozess unmittelbar in Verbindung stehen (Bsp.: CF₄-Emissionen in der Primärproduktion von Aluminium), zusammen. Anschließend wird die so ermittelte Gesamtemissionsmenge eines Stoffes zum Einsatz in der Erzeugung erneuerbarer Energie durch die zusätzlich erzeugte Energiemenge gegenüber dem Vorjahr dividiert, um die Normierung auf die Emission pro Energieeinheit zu gewährleisten. Abschließend wird der Emissionsfaktor in Anlehnung an die Methodik der Emissionsbilanz durch die durchschnittliche technische Lebensdauer der erneuerbaren Energiebereitstellung geteilt. Ein entsprechendes Rechenbeispiel ist im Anhang des 2. Berichtes zu finden.

⁷ Eine Aufsummierung der einzelnen Werte ist hier nicht zielführend, denn das würde voraussetzen, dass alle verwendeten Materialien denselben Anteil hätten. Man braucht jedoch aber z.B. weniger Kupfer als etwa Modul-Material im Falle der PV. Eine Summe würde also die Realität verzerren.

Abbildung 8 Materialspezifische Emissionsfaktoren je kW installierte Leistung - Photovoltaik

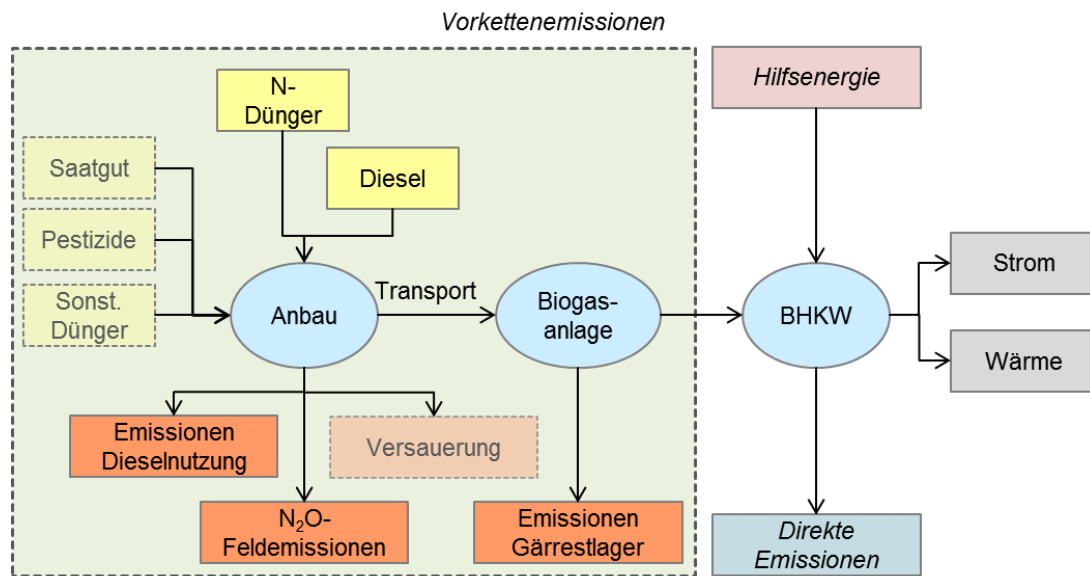


Quelle: Eigene Darstellung nach UBA (2017a), UBA (2016a) und IINAS (2013)

2.2.3 Möglichkeiten der Harmonisierung am Beispiel von Biogas

Auch die Analyse des Energieträgers Biogas konzentrierte sich auf die Vorkettenemissionen. Im Zentrum der Vorketten stehen die Emissionen, die beim Anbau und Vergärung der Energiepflanzen anfallen. Für die Analyse wurden die relevanten Berechnungsfaktoren für jene Elemente abgeleitet, welche den größten Anteil an den Gesamtemissionen tragen. Dies sind: Stickstoffdüngerproduktion („N-Dünger“), Dieselproduktion und -nutzung, Lachgas-Feldemissionen (N₂O-Feldemissionen) sowie Emissionen aus dem Gärrestlager. Abbildung 9 veranschaulicht den Pfad der Biogasproduktion vom Anbau der Pflanzen bis zur Verbrennung des Biogases zur Energiegewinnung. Tabelle 4 zeigt den zusammenfassenden Vergleich der Vorkettenemissionen in der Biogasnutzung.

Abbildung 9 Emissionen und Inputs in der Strom- und Wärmeproduktion aus Biogas



Quelle: eigene Darstellung; gestrichelt / transparent gehaltene Kästchen: in Projektberechnung nicht betrachtet

Tabelle 4 Vorkettenemissionen – Biogasnutzung

Biogas aus	Emissionsbilanz [g CO ₂ -Äq. / kWh Biogas]						Analogie im THG-Inventar [g CO ₂ -Äq. / kWh Biogas]					
	Saatgut, Pestizide, sonst. Dünger	N-Dünger	N ₂ O-Feldemissionen	Gärrestlager	Dieselnutzung, Transport	Summe Vorkette	Saatgut, Pestizide, sonst. Dünger	N-Dünger	N ₂ O-Feldemissionen	Gärrestlager	Dieselnutzung, Transport	Summe Vorkette
Mais - geschl. Gärrestlager	5,14	6,7	32,2	18	10,8	72,8 (60,9***)	n.b.*	n.a.**	32,2	35,1	9,07	76,4
Mais - offenes Gärrestlager	5,14	6,7	32,2	39,9	10,8	94,7 (82,8***)	n.b.*	n.a.**	32,2	49,6	9,07	90,9

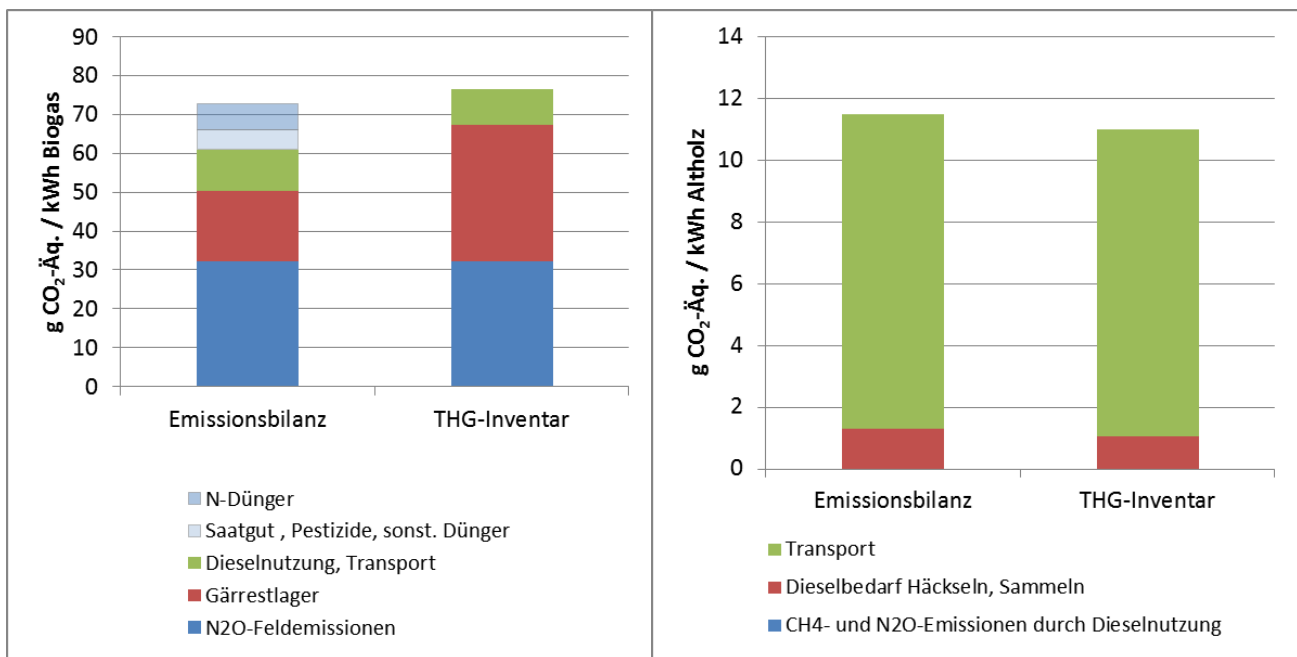
Quellen: Eigene Darstellung nach UBA (2017a) und UBA (2016a)

*n.b.: in Projektberechnungen nicht betrachtet; **n.a.: in Inventartabellen nicht ausweisbar; ***Teilsomme der Elemente, die auch im THG-Inventar abgeleitet wurden

Im THG-Inventar konnte kein Berechnungsfaktor für den Stickstoffdünger abgeleitet werden. Es werden dort lediglich die Emissionen der Produktion der Ausgangsstoffe Ammoniak und Salpetersäure berichtet, nicht jedoch die Herstellung des Düngers selbst. Im Gegensatz dazu stimmen die Emissionen aus der Ausbringung des Stickstoffdüngers (sogenannte N₂O-Feldemissionen) in beiden Berichten gut überein. Der Grund ist, dass in beiden Berichten auf dieselbe Methode (IPCC Tier 1) zurückgegriffen wird. Die Emissionen aus dem Gärrestlager wiederum weisen teils erhebliche Abweichungen auf. Dies wird nicht durch methodische Unterschiede verursacht, sondern durch eine unterschiedliche Datenbasis: Das THG-Inventar bildet die in Deutschland spezifischen Umstände genau ab. Die der Emissionsbilanz zugrunde liegende Datenbasis (Jacopo Giuntoli et al. 2014) diene der Ableitung europäischer Durchschnittswerte, nutzt dementsprechend andere Quellen und ist weniger detailliert. Die Gärrestlagerung bietet damit eine gute Möglichkeit der Harmonisierung. Auch für Transporte und die Dieselnutzung bestehen gute Harmonisierungsmöglichkeiten, da lediglich unterschiedliche Daten genutzt wurden. Auf die Transportleistung bezogen kommt die Emissionsbilanz auf einen höheren Emissionsfaktor als das THG-Inventar. Im Vergleich zur Gärrestlagerung jedoch fallen diese Unterschiede bezogen auf die gesamte Biogasherstellung kaum ins Gewicht.

Abbildung 10 zeigt noch einmal einen grafischen Überblick über die Vorkettenemissionen. Auf der linken Seite sind die Emissionen für Biogas dargestellt. Als Vergleich werden auf der rechten Seite die Vorkettenemissionen der Nutzung fester Biomasse dargestellt. Hier fallen die Unterschiede in den Transportemissionen etwas stärker ins Gewicht. Da vor allem Rest- und Abfallholz zum Einsatz kommt, sind die Transporte die einzigen Emissionsquellen.

Abbildung 10 Vergleich der Vorkettenemissionen in der Biogas- und Altholznutzung



Quelle: Eigene Darstellung nach UBA (2017a), UBA (2016a) und IINAS (2013)

Bezüglich der Stromerzeugung aus Biogas unterscheiden sich Emissionsbilanz und THG-Inventar deutlich. Anders als bei Photovoltaik bestehen hier jedoch gute Möglichkeiten der Harmonisierung, wobei die Relevanz in Bezug auf die Gesamtemissionen berücksichtigt werden sollte.

2.2.4 Fazit

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass es teils erhebliche Unterschiede in den beiden Berichtssystemen gibt, welche maßgeblich in der jeweiligen Zielsetzung und Methoden sowie der zugrunde liegenden Datenbasis behaftet sind. Eine Harmonisierung von THG-Inventar und Emissionsbilanz ist somit nicht für alle Energieträger zu erreichen. Gerade im Falle von Energieträgern, bei denen die Vorkettenemissionen dominieren und deren Wertschöpfung zu großen Teilen außerhalb Deutschlands stattfindet, ist ein Vergleich beider Berichtswesen äußerst schwierig.

Bei der Analyse ergaben sich dort Spielräume der Harmonisierung, wo die Unterschiede nicht durch methodische Unterschiede verursacht wurden, sondern durch eine unterschiedliche Datenbasis. Dies ist teilweise im Bereich biogener Energieträger in den Sektoren Strom und Wärme der Fall. Im Gegensatz dazu sind die Harmonisierungsmöglichkeiten für nicht-biogene Energieträger in allen drei Sektoren eingeschränkt. Dies liegt an der unterschiedlichen Philosophie (Quellgruppenprinzip vs. Verursacherprinzip) in Kombination mit weitestgehend emissionslosem Anlagenbetrieb, niedrigem Hilfsenergiebedarf und der Dominanz der materialspezifischen Berechnungsfaktoren.

3 Komponentenzerlegung deutscher Emissionen

3.1 Anmerkungen zur Methode

Eine Komponentenzerlegung quantifiziert Beiträge wichtiger Treiber auf die zeitliche Entwicklung einer Variable (z.B. energiebedingte Treibhausgasemissionen). Wichtige Treiber sind z.B. die Bevölkerungs- oder Wirtschaftsentwicklung. Diese Quantifizierung erfolgt in der gleichen Einheit, in der die Variable gemessen wird (z.B. in Mt CO₂-Äq.). Das hat einen Mehrwert, denn in der Regel werden die treibenden Kräfte hinter einer Entwicklung in anderen Einheiten gemessen und der Anteil, den sie an der Entwicklung haben, ist daher nicht direkt ersichtlich. Es gibt eine Vielzahl von Methoden zur Komponentenzerlegung. Im Rahmen dieser Studie wird der additive Logarithmic Mean Divisia Index (LMDI) Ansatz verfolgt, der eine Reihe von dokumentierten Vorteilen mit sich bringt (Ang 2004). Der LMDI-Ansatz findet Anwendung in einer Vielzahl von Studien, z.B. EEA (2014, 2015a, 2015b, 2017a), Colinet Carmona und Román Collado (2016), Dai Ying et al. (2015), Fernández González et al. (2014), Förster et al. (2013) und Öko-Institut e.V. (2012). Damit ermöglicht dieses Vorgehen auch eine Vergleichbarkeit zwischen Studien. Eine genauere Einordnung dieses Ansatzes findet sich in Kapitel 2 des Teilberichtes 3.

Die hier durchgeführte Komponentenzerlegungen erfolgen jeweils für einen genau definierten Betrachtungsraum: zeitlich, emissionsseitig, sowie sektorensseitig. Der Betrachtungsraum gibt damit vor, welche Elemente berücksichtigt werden und wo die Grenzen der Betrachtung verlaufen:

- Zeitlich berücksichtigt werden, soweit es die Datenlage erlaubt, die Jahre 1990 bis 2015. Abgedeckt wird damit der komplette für die Öffentlichkeit relevante Zeitraum der Emissionsberichterstattung⁸.
- Emissionsseitig werden die direkten Emissionen gemäß der Berichterstattung im deutschen Treibhausgasinventar (UBA 2017b) berücksichtigt. Das bedeutet, dass die Emissionen gemäß Quellen-Logik dort berücksichtigt werden, wo sie entstehen oder wo sie zugeordnet sind.
- Sektorensseitig werden acht Komponentenzerlegungen durchgeführt. Zwei sektorübergreifende Analysen helfen, den Kontext zu generieren: hier werden erstens die gesamten THG-Emissionen analysiert (Makro-Analyse 1), sowie zweitens alle energiebedingten CO₂-Emissionen (Makro-Analyse 2). Letztere machen rund 80 % der gesamten THG-Emissionen aus. Die sechs sektoralen Komponentenzerlegungen (farblich hervorgehoben in Abbildung 11 decken aktuell wiederum ca. 90 % der energiebedingten CO₂-Emissionen ab.

Die Ergebnisse der einzelnen Sektoren können nicht direkt miteinander verglichen oder summiert werden: je nach Sektor, Datenverfügbarkeit und Fragestellung berücksichtigen die Komponentenzerlegungen teilweise den Primärenergieeinsatz oder nur den Endenergieverbrauch. Auch die Behandlung der Erzeugung von Strom aus Atomkraftwerken unterscheidet sich in der Makro-Analyse und der

⁸ Auf Grund internationaler Verpflichtungen werden Emissionsentwicklungen häufig gegenüber dem Bezugsjahr 1990 betrachtet. Als Basisjahr wird 1990 im Rahmen des Kyoto-Protokolls bezeichnet und unterliegt dort besonderen Herleitungen, die auch von 1990 abweichende Jahre einschließen kann, weshalb diese Bezeichnung nicht mehr zeitgemäß ist. Am aktuellen Rand wird 2015 nach dieser Analyse bereits ersetzt werden müssen durch 2016 und kann auch beliebig durch Prognosejahre ausgetauscht werden.

Analyse des Stromsektors. Die Emissionen, die in der Vorkette⁹ entstehen, bleiben bei der Komponentenzerlegung unberücksichtigt.

Abbildung 11: Skizze des Betrachtungsraumes entsprechend der aktuellen Emissionsanteile



Anmerkungen: Die Größe der Felder ist proportional zu ihrem Anteil an den gesamten THG-Emissionen in 2015. Quelle: Eigene Berechnung basierend auf UBA (2016b).

3.2 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Komponentenzerlegung für jeden betrachteten Sektor kurz veranschaulicht und interpretiert. Die Zerlegung erfolgt jeweils gegenüber einem Bezugsjahr. In den meisten Fällen ist dies 1990. In drei Sektoren ist dies auf Grund der Datenlage jedoch nicht möglich: Fernwärme (Bezugsjahr 2003), Personenstraßenverkehr (Bezugsjahr 1994) und Straßengüterverkehr (Bezugsjahr 1991).

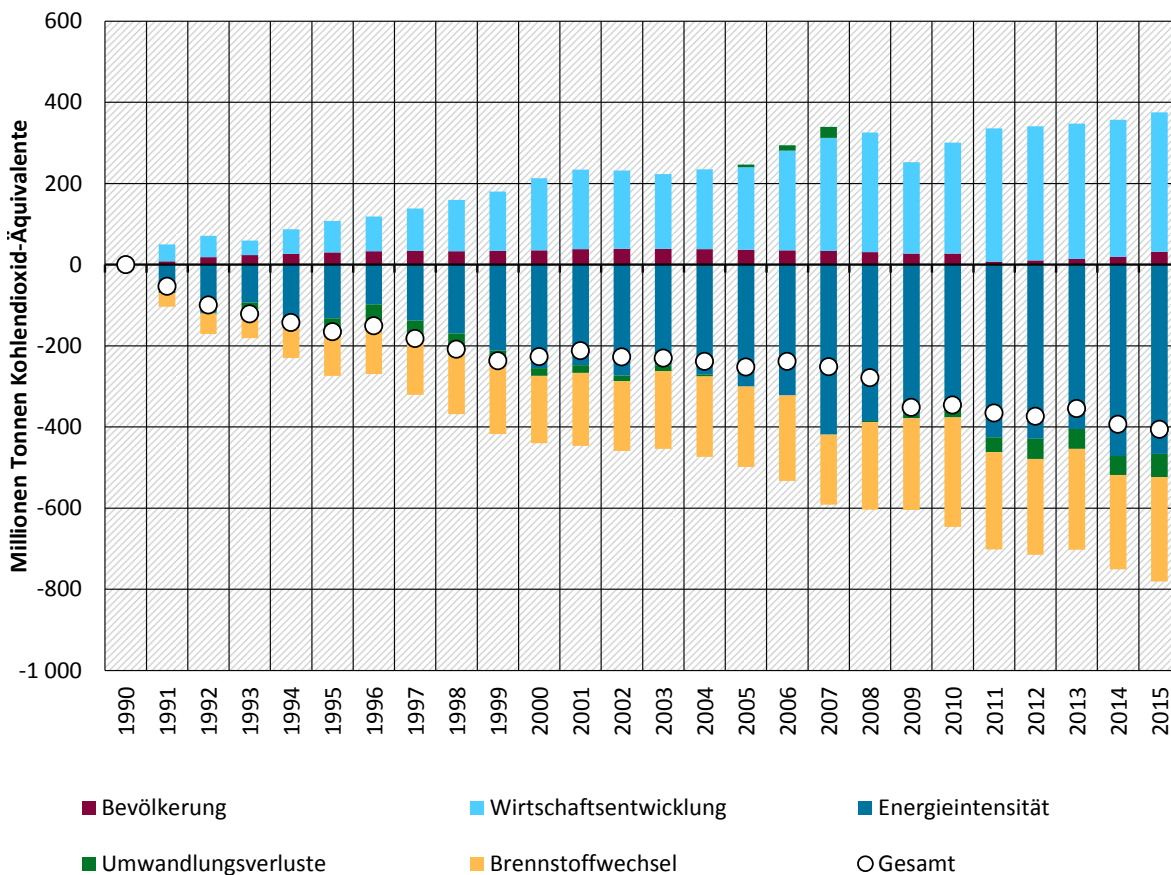
Der Teilbericht 3 beinhaltet darüber hinaus Informationen zur Jahr-auf-Jahr Veränderung der Emissionen und der jeweiligen Beiträge der Treiber gemäß der Komponentenzerlegung.

⁹ Sofern es sich bei der Biomassenutzung nicht um biogene Reststoffe und Abfälle handelt, sind bei einer vollständigen Bilanzierung neben den klassischen Vorketteemissionen (Anbau, Transport und Verarbeitung) zusätzlich Landnutzungsänderungen durch den Energiepflanzenanbau zu beachten. Sie können die Bilanzergebnisse maßgeblich beeinflussen. Hier gilt es zwischen direkten Landnutzungsänderungen (u. a. Grünlandumbruch) und indirekten Landnutzungsänderungen (Verdrängungs- und Umnutzungseffekte als Konsequenz des Anbaus von Energiepflanzen, „iLUC“) zu unterscheiden.

3.2.1 Makro-Analyse 1 – Gesamte THG-Emissionen

Die folgende Abbildung zeigt die Anteile, mit denen die Emissionstreiber Bevölkerung, Wohlstand, Energieintensität, Umwandlungsverluste und Energieträgermix zur Veränderung der gesamten deutschen THG-Emissionen gegenüber 1990 beitrugen. Der Effekt jedes Jahres bezieht sich immer auf die Veränderung gegenüber 1990.

Abbildung 12: Komponentenzerlegung der Entwicklung der THG-Emissionen seit 1990



Quelle: Eigene Berechnung basierend auf StBA (2017), AGEb (2016a) und UBA (2016b)

Von 1990 bis 2015 sanken die deutschen THG-Emissionen um knapp 28 %. **Die wesentlichen Treiber dieser Reduktion** sind laut Dekompositionsanalyse sinkende Energieintensität (dunkelblaues Segment) sowie ein Brennstoffwechsels (orangenes Segment). Die Energieintensität gibt an, wieviel Energie zur Erwirtschaftung einer Einheit Bruttoinlandsprodukt benötigt wird. Je energieeffizienter (z.B. je dienstleistungsorientierter) eine Wirtschaft ist, desto weniger Energie braucht sie je Einheit Bruttoinlandsprodukt. Der Energieträgermix hingegen trifft Aussagen über den Anteil der verschiedenen Energieträger am gesamten Energieeinsatz. Je mehr fossile Energieträger enthalten sind, desto stärker emissionsstrebend wirkt er. Werden fossile Energieträger sukzessive durch erneuerbare ersetzt, so sinkt der emissionsstrebende Effekt mit der Zeit und trägt zu Emissionsminderungen bei.

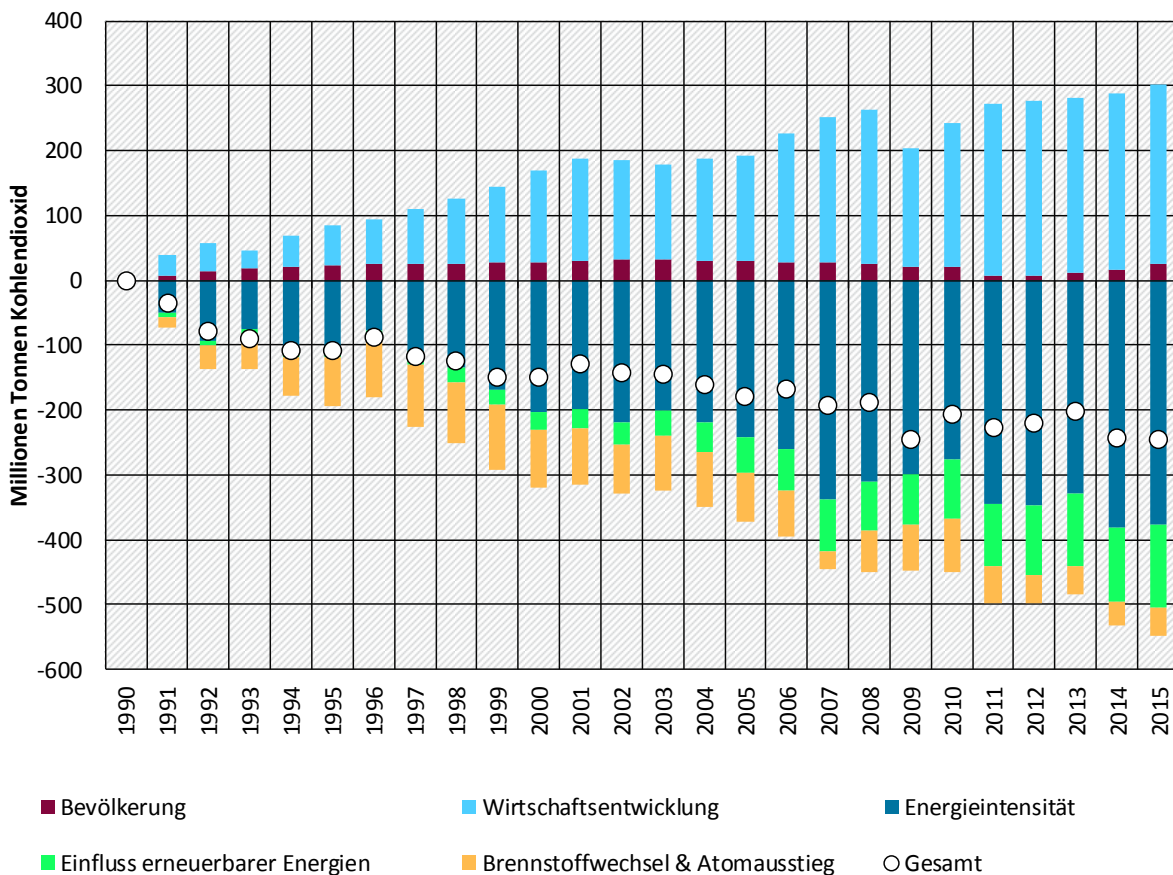
Der emissionsmindernde Beitrag dieser Treiber gleicht den emissionsstrebenden Effekt der anderen Treiber mehr als aus. Der stärkste emissionssteigernde Treiber der gesamten THG-Emissionen ist durchgängig die Wirtschaftsentwicklung, gemessen als Bruttoinlandsprodukt pro Person (hellblau).

Sichtbar sind in dieser kumulierten Betrachtung eher Trends als jährliche Besonderheiten. Trotzdem wird aus dieser Betrachtung die Bedeutung der wirtschaftlichen Krise im Jahr 2009 deutlich: Der emissionssteigernde Effekt der Wirtschaftsentwicklung erfährt in diesem Jahr einen deutlichen Knick.

3.2.2 Makro-Analyse 2 – Energiebedingte CO₂-Emissionen

Die folgende Abbildung zeigt die Anteile, mit denen die Emissionstreiber Bevölkerung, Wirtschaftsentwicklung, Energieintensität, Einfluss erneuerbarer Energien und Brennstoffwechsel & Atomausstieg zur Veränderung der deutschen energiebedingten CO₂-Emissionen gegenüber 1990 beitrugen. Der Effekt jedes Jahres bezieht sich immer auf die Veränderung gegenüber 1990.

Abbildung 13: Komponentenzerlegung der energiebedingten CO₂-Emissionen seit 1990



Quelle: Eigene Berechnung basierend auf StBA (2017), AGEb (2016a) und UBA (2016b). Von 1990 bis 2015 sanken die deutschen energiebedingten CO₂-Emissionen um knapp 25 %. **Die wesentlichen Treiber dieser Reduktion** sind laut Dekompositionsanalyse sinkende Energieintensität (dunkelblaues Segment), Brennstoffwechsel & Atomausstieg (orangefarbenes Segment) sowie ein zunehmender Einfluss erneuerbarer Energien (grünes Segment). Der emissionsmindernde Beitrag dieser Treiber gleicht den emissionssteigernden Effekt der anderen Treiber mehr als aus. Der stärkste emissionssteigernde Treiber der energiebedingten CO₂-Emissionen ist durchgängig die Wirtschaftsentwicklung (hellblau).

Wie auch in der Makro-Analyse 1 ist auch hier gut die Auswirkung der wirtschaftlichen Krise im Jahr 2009 sichtbar.

3.2.3 Strom

Abbildung 14 zeigt, in welchem Umfang die verschiedenen Treiber zur Entwicklung der CO₂-Emissionen seit 1990 beigetragen haben. Dabei fällt auf, dass die CO₂-Emissionen zwischen 1990 und 1999 zunächst kontinuierlich gesunken sind. 1999 lagen sie etwa 50 Mio. t oder 13 % unter dem Wert von

1990. Seitdem schwanken die CO₂-Emissionen jedoch und befinden sich 2015 wieder in einer ähnlichen Höhe wie 1999.

Die Ergebnisse der Dekompositionsanalyse zeigen, welche Treiber für diese Entwicklung eine Rolle gespielt haben. Unter den Treibern sind der **Stromverbrauch**, der Rückgang der **Kernenergie**, die **Effizienz** der fossilen Erzeugung und der Zubau der **erneuerbaren Energien** diejenigen mit den größten Effekten im Vergleich zu 1990. Dabei treiben die Entwicklung des Stromverbrauchs und der Kernenergiebereitstellung die Emissionen in die Höhe. Die Effizienz der fossilen Erzeugung und der Zubau der erneuerbaren Energien senken die CO₂-Emissionen. Dabei werden sowohl die Effekte des Kernenergie rückgangs als auch des Zubaus erneuerbarer Energien mit der Zeit deutlich stärker, während der Einfluss von Stromverbrauch und Effizienz im Zeitraum der jüngsten 10 Jahre in etwa konstant geblieben sind.

Ähnliches gilt für die Entwicklung der **Verluste** (Kraftwerkseigenverbrauch, Pumpstromverluste, Netzverluste), die zwar gegenüber 1990 zu einer Emissionsminderung beitragen, sich jedoch seit 1997 nicht mehr stark verändern. Die **Emissionsintensität**, die ein Maß für das Verhältnis von Kohle zu Erdgas bei der Stromerzeugung ist, hat ebenfalls nur einen kleinen emissionsmindernden und in den letzten Jahren sogar wieder rückläufigen Beitrag. Dagegen führt die Entwicklung des **Stromaus-tauschsaldos** in den meisten Jahren gegenüber 1990 zu einem Anstieg der CO₂-Emissionen. Dieser Effekt nimmt in den letzten Jahren durch die im Saldo stetig steigenden Stromexporte weiter zu.

Im aktuellsten Jahr des betrachteten Zeitraums, 2015, tragen die einzelnen Treiber wie folgt zur Veränderung der CO₂-Emissionen gegenüber 1990 bei: Steigernd wirken sich der Endenergieverbrauch mit 45 Mio. t, der Stromaustauschsaldo mit 29 Mio. t und der Rückgang der Kernenergie mit 73 Mio. t aus. Zur Senkung der CO₂-Emissionen tragen die niedrigeren Verluste mit 19 Mio. t, die höhere Effizienz der fossilen Erzeugung mit 43 Mio. t, die Emissionsintensität der eingesetzten fossilen Brennstoffe mit 5 Mio. t und die erneuerbaren Energien als mit Abstand größter Treiber mit 137 Mio. t bei.

Von dieser Minderung durch erneuerbare Energien im Jahr 2015 gegenüber 1990 entfallen 59 Mio. t auf Wind an Land, 40 Mio. t auf Biomasse inklusive biogenem Hausmüll, 32 Mio. t auf die Solarenergie und 7 Mio. t auf Wind auf See. Die Wasserkraft trägt im Vergleich zu 1990 in den meisten Jahren nur zu einer kleinen Minderung der Emissionen bei (manchmal sogar zu einer Emissionssteigerung), weil sie als älteste Technologie bereits 1990 in ähnlichem Umfang genutzt wurde wie heute und bei der Analyse nur der Unterschied gegenüber 1990 wirksam wird.

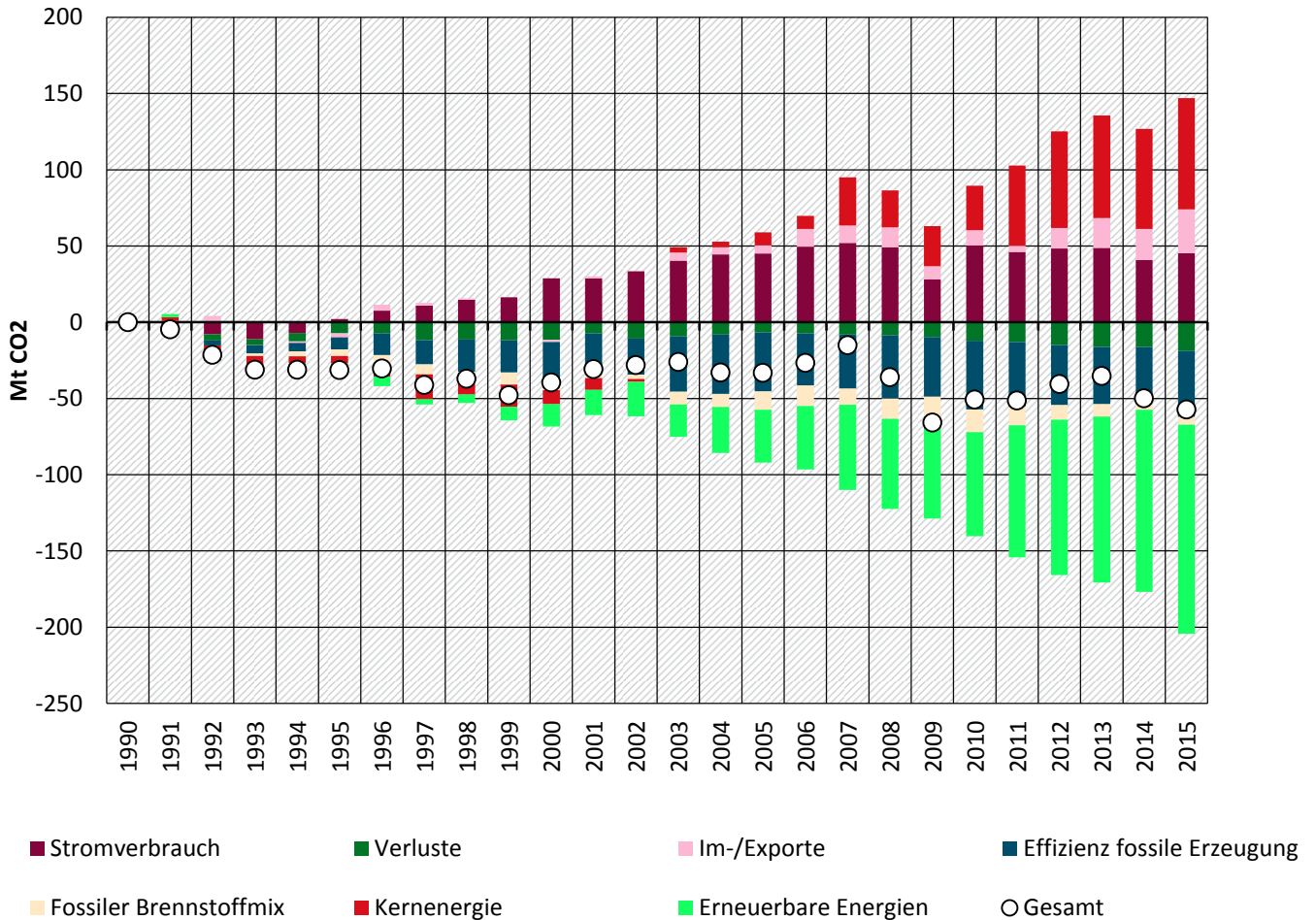
Besondere Extreme in der Entwicklung der CO₂-Emissionen stellen die Jahre 2007 und 2009 dar. 2007 stiegen die CO₂-Emissionen auf den höchsten Wert seit 1992, 2009 sanken sie auf den niedrigsten Wert im gesamten Betrachtungszeitraum. Der Anstieg der CO₂-Emissionen im Jahr 2007 geht vor allem auf den verminderten Einsatz der Kernenergie in diesem Jahr zurück. Die Blöcke Biblis A und B, sowie die Reaktoren Brunsbüttel und Krümmel waren aus verschiedenen Gründen über lange Zeiträume des Jahres 2007 nicht in Betrieb.¹⁰

Für das Jahr 2009, in dem die CO₂-Emissionen ihr Minimum im Betrachtungszeitraum erreichten, zeigt die Dekompositionsanalyse deutlich den Einfluss des Stromverbrauchs, der in diesem Jahr besonders

¹⁰ Biblis A: Stillstand Januar bis Dezember 2007 wegen Überprüfung des spezifikationsgerechten Einbaus von Dübeln; Biblis B: Stillstand von Januar bis November wegen Revision und Dübelsanierungsprogramm; Brunsbüttel: Nach zwei Abschaltungen im Juni wegen Störung in der Kühlwasserversorgung des Generators und Kurzschluss in der E.ON-Schaltanlage längerer Stillstand von Juli bis Dezember wegen Überprüfung von Bauverankerungen bzw. Dübelverbindungen; Krümmel: Reaktorschnellabschaltung Ende Juni wegen Ausfall der Eigenbedarfsversorgung aufgrund eines Kurzschlusses in einem Maschinentransformator mit Brandfolge, Stillstand bis Jahresende (atw – Internationale Zeitschrift für Kernenergie 2008).

niedrig war. Hier zeigt sich der Effekt der Wirtschaftskrise, die zu einer niedrigeren Stromnachfrage geführt hat.

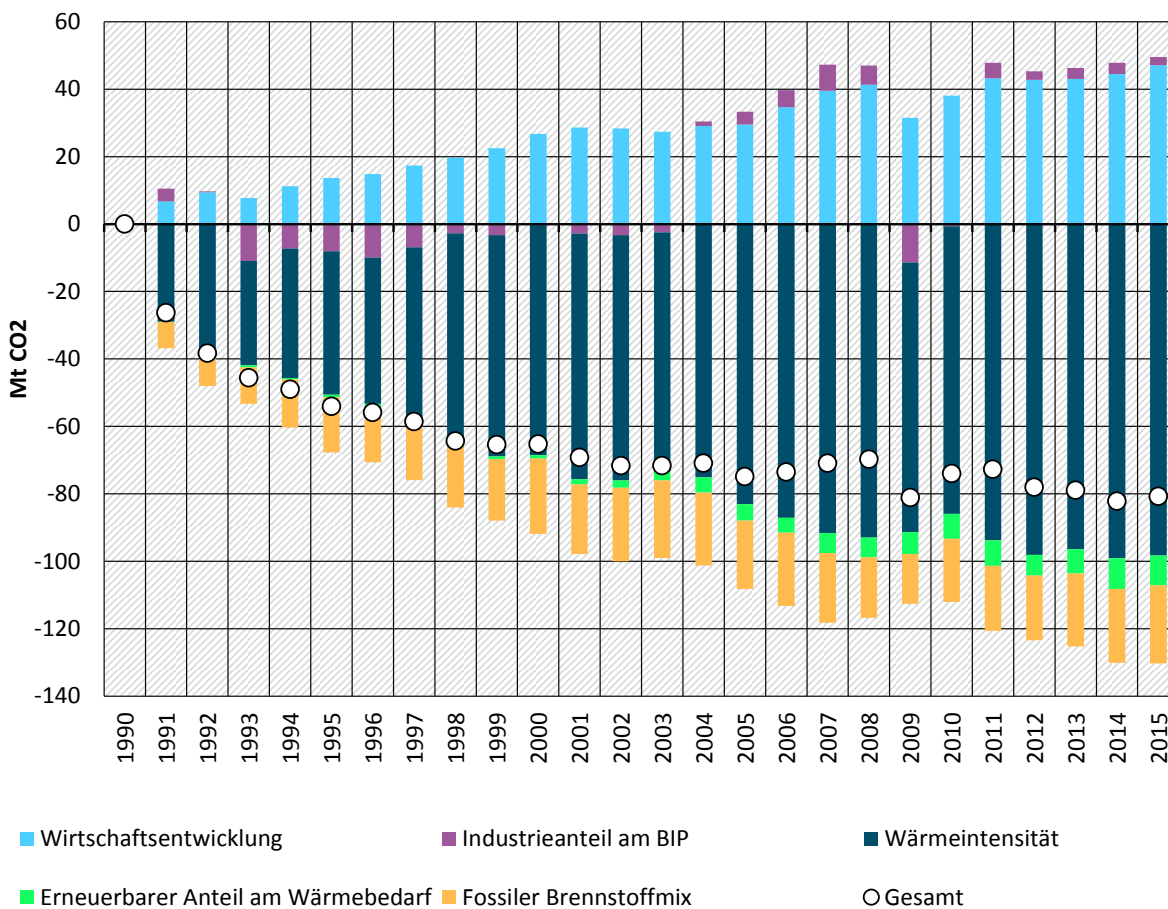
Abbildung 14: Komponentenzerlegung der CO₂-Emissionen des Stroms seit 1990 (erneuerbare Energien zusammengefasst)



Quelle: Eigene Berechnung basierend auf AGEb (2016b), AGEb (2017), UBA (2016b) und BMWi (2017)

3.2.4 Industrierwärme

Die folgende Abbildung 15 zeigt die Anteile, die die Emissionstreiber Wirtschaftsentwicklung, Industrieanteil am Bruttoinlandsprodukt (BIP), Wärmeintensität, erneuerbarer Anteil am Wärmebedarf und fossiler Brennstoffmix zur Veränderung der energetischen CO₂-Emissionen der Industrierwärme gegenüber 1990 beitrugen. Der Effekt jedes Jahres bezieht sich immer auf die Veränderung gegenüber 1990.

Abbildung 15: Komponentenzerlegung der CO₂-Emissionen der Industriewärme seit 1990

Quelle: Eigene Berechnung basierend auf AGEB (2016a) und UBA (2016b)

Zwischen 1990 und 2015 sanken die Emissionen der Industriewärme von 178 Mt CO₂ auf 98 Mt CO₂. Dies entspricht einem Rückgang um 81 Mt CO₂ bzw. 45 %. Der mit Abstand stärkste Treiber ist eine zwischen 1990 und 2015 um 52 % gesunkene Wärmeintensität (dunkelblaues Segment), also der Wärmeeinsatz pro erwirtschafteter Wertsteigerung. Im Jahr 2015 ist ihr sogar ein Emissionsrückgang von 98 Mt CO₂ gegenüber 1990 zuzuordnen. Zu Beginn der 1990er-Jahre hat hierbei insbesondere der wirtschaftliche Niedergang der in Teilen energetisch sehr ineffizienten ostdeutschen Wirtschaftsbereiche einen wichtigen Einfluss.

Ein deutlich emissionssteigernder Treiber ist die Wirtschaftsentwicklung. Das im Jahr 2015 gegenüber 1990 (real) 42 % höhere Bruttoinlandsprodukt verursachte 2015 zusätzliche 47 Mt CO₂-Emissionen. Im Wirtschaftskrisenjahr 2009 sanken die Emissionen erheblich aufgrund verminderter Wirtschaftsleistung, die wirtschaftliche Entwicklung war 2009 deutlich weniger emissionstreibend als in den Jahren davor und danach. Der Industrieanteil am BIP (weinrot Segment) führte in den 1990er- und den frühen 2000er-Jahren zu leicht steigenden Emissionen: Auf einige Jahre mit tendenzieller De-Industrialisierung folgte seit Mitte der 2000er-Jahre eine Phase der Re-Industrialisierung.

Es zeigt sich, dass im Bereich der Energieträger bisher der Wechsel fossiler Brennstoffe untereinander eine deutlich höhere Emissionsminderungswirkung hat als der Einsatz erneuerbarer Energien: Der fossile Brennstoffmix (gelbes Segment) ist deutlich emissionsärmer geworden, der durchschnittliche Emissionsfaktor sank zwischen 1990 und 2015 um 16 %. Dadurch wurden 23 Mt CO₂ im Jahr 2015 eingespart. In der Veränderung des fossilen Brennstoffmixes ist allerdings auch die Zunahme der Nutzung von Fernwärme enthalten, deren Emissionen nicht direkt bei der Industrie sondern in der Energiewirtschaft erfasst werden. Insofern ist die Fernwärmenutzung eine Verlagerung von Emissionen.

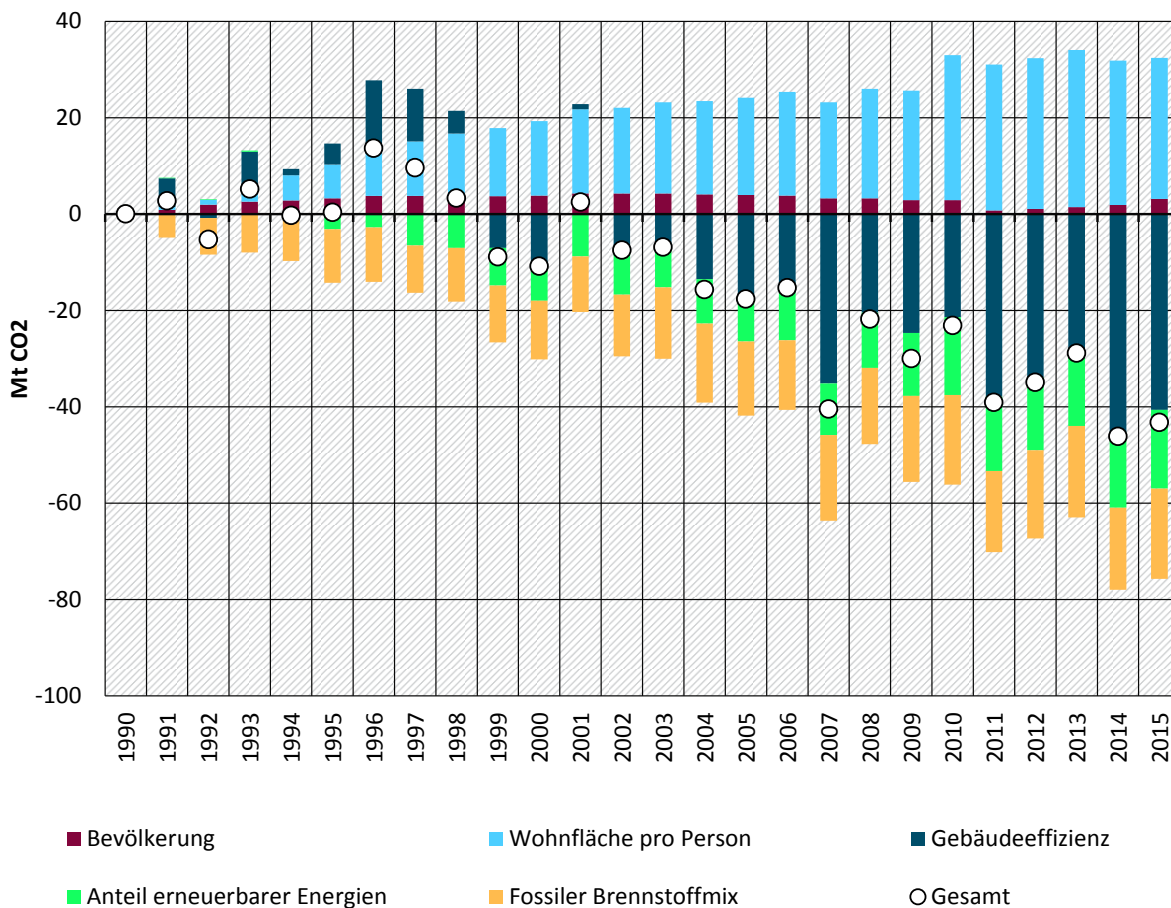
Der erneuerbare Anteil am Wärmebedarf stieg von 2 % im Jahr 1990 auf 8 % im Jahr 2015. Hierdurch wurden im Jahr 2015 die Emissionen um knapp 9 Mt CO₂ gegenüber 1990 gesenkt (gelbes Segment). Einen merklichen Effekt haben die erneuerbaren Energien erst seit 2003. Dies ist teilweise ein statistisches Artefakt, denn mit der Novelle des Energiestatistikgesetzes 2003 wurden die erneuerbaren Energien besser erfasst.

In Summe sind die emissionsenkenden Treiber (Wärmeintensität, fossiler Brennstoffmix und erneuerbarer Anteil am Wärmebedarf) größer als die emissionssteigernden Treiber (Wirtschaftsentwicklung sowie teilweise Industrieanteil am BIP), so dass es insgesamt über den Zeitraum 1990 bis 2015 zu einer Senkung der CO₂-Emissionen der Industriewärme kommt.

3.2.5 Raumwärme

Die folgende Abbildung zeigt, wie die Emissionstreiber Bevölkerung, Wohnflächen pro Person, Gebäudeeffizienz, Anteil erneuerbarer Energien und fossiler Brennstoffmix zur Veränderung der direkten CO₂-Emissionen privater Haushalte gegenüber 1990 beitragen. Der Effekt jedes Jahres bezieht sich immer auf die Veränderung gegenüber 1990.

Abbildung 16: Komponentenzerlegung der Entwicklung der CO₂-Emissionen der Raumwärme seit 1990



Quelle: Eigene Berechnung basierend auf StBA (2017), AGEb (2016a) und UBA (2016b)

Stärkster Treiber der Emissionsentwicklung im Bereich der Raumwärme ist die Gebäudeeffizienz (hier angegeben als Endenergieverbrauch pro Fläche, dunkelblaues Segment). Diese hat sich zwischen 1990 und 2015 um 32 % verbessert und so zu einer Einsparung von 41 Mt CO₂ zwischen 1990 und 2015 geführt. Diese Verbesserung ist zum einen durch schärfere energetische Standards bei neuen Wohnge-

bäuden, zum anderen durch energetische Sanierungen (zum Beispiel durch Dämmung) von bestehenden Wohngebäuden zurückzuführen.¹¹ Erkennbar sind hier auch Witterungseffekte: In den besonders warmen Jahren – wie beispielsweise 2007 und insbesondere 2014 – ist der Endenergieverbrauch für Raumwärme und somit die CO₂-Emissionen deutlich niedriger als sonst. In besonders kalten Jahren – wie beispielsweise 1996 und 2010 – zeigt sich ein gegenteiliger Effekt.

Der zweitstärkste Treiber sind deutlich gestiegene Wohnflächen pro Person (hellblaues Segment). Standen im Jahr 1990 im Schnitt noch 34,8 m²/Person zur Verfügung, stieg die Wohnfläche auf 45,9 m²/Person im Jahr 2015 an. Damit werden im Jahr 2015 im Schnitt 32 % mehr Wohnfläche pro Person beansprucht als noch 1990. Da diese meist auch beheizt wird, stiegen die Emissionen im Jahr 2015 um etwa 29 Mt. CO₂. Zusätzlich führte eine leichte Steigerung der Bevölkerung (weinrot Segment) von 79,8 Millionen um 3 % auf 82,2 Millionen zu einer weiteren Emissionssteigerung um 3 Mt CO₂ im Jahr 2015.

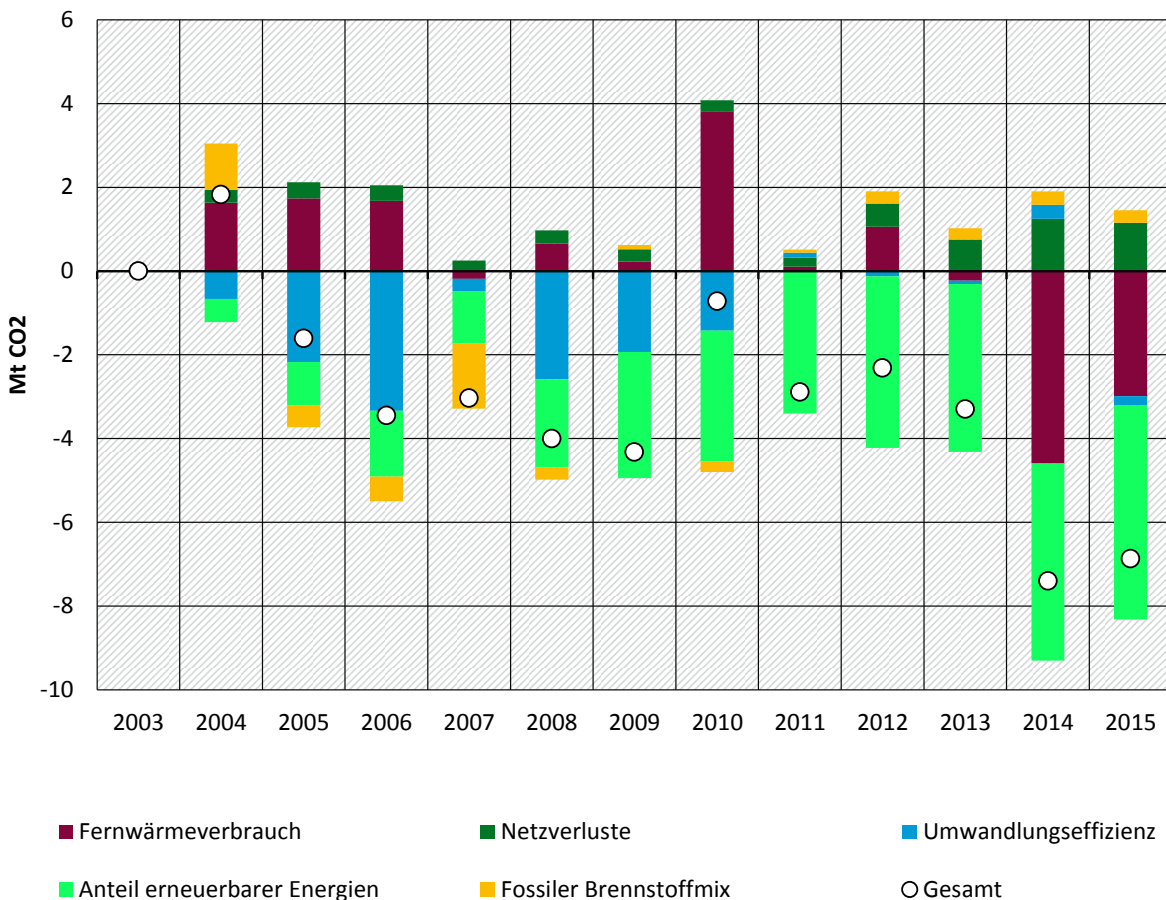
Im Bereich der Energiebereitstellung gibt es zwei ähnlich große Treiber: Der Anteil erneuerbarer Energien an der Raumwärme (grünes Segment) ist von 2 % im Jahr 1990 auf 16 % im Jahr 2015 gestiegen, dadurch wurden 16 Mt CO₂ eingespart (2015). Der fossile Brennstoffmix (gelbes Segment) ist deutlich emissionsärmer geworden, der durchschnittliche Emissionsfaktor sank zwischen 1990 und 2015 um 16 %. Dadurch wurden 19 Mt CO₂ im Jahr 2015 gegenüber 1990 eingespart. In der Veränderung des fossilen Brennstoffmixes ist allerdings auch die erweiterte Nutzung von Fernwärme enthalten, deren Emissionen nicht direkt bei den privaten Haushalten sondern in der Energiewirtschaft erfasst werden (siehe nächstes Kapitel).

3.2.6 Fernwärme

Die folgende Abbildung zeigt, wie die Emissionstreiber Fernwärmeverbrauch, Netzverluste, Umwandlungseffizienz, Anteil erneuerbarer Energien und der fossile Brennstoffmix zur Veränderung der direkten CO₂-Emissionen der Fernwärmeerzeugung gegenüber 2003 beitragen. Der Effekt jedes Jahres bezieht sich immer auf die Veränderung gegenüber 2003.

¹¹ So wurden beispielsweise zwischen 2005 und 2015 etwa 2,3 Millionen Wohnungen mit Fördermitteln der bundeseigenen KfW gefördert (IWU und Fraunhofer IFAM 2016).

Abbildung 17: Komponentenzerlegung der Entwicklung der CO₂-Emissionen der Fernwärme seit 2003



Quelle: Eigene Berechnung basierend auf AGEB (2016b) und UBA (2016b)

Insgesamt sind die CO₂-Emissionen der Fernwärme zwischen 2003 und 2015 um 6,9 Mt CO₂ bzw. 17 % gesunken. Stärkster Treiber im Jahr 2015 ist der deutlich erhöhte Anteil erneuerbarer Energien (hellgrünes Segment) mit einer Reduktionswirkung von 5,1 Mt CO₂. Die gegenüber 2003 gesunkene Fernwärmenachfrage (weinrotes Segment) senkte die Emissionen 2015 um 3,0 Mt CO₂. Allerdings ist die Fernwärmenachfrage stark witterungsabhängig. Veränderte Netzverluste sind emissionstreibend, im Jahr 2015 führte dies zu 1,2 Mt zusätzlichen CO₂-Emissionen gegenüber 2003 (dunkelgrünes Segment). Eher untergeordnete Bedeutung und in der Zeitreihe schwankend sind die Auswirkungen der Veränderung des fossilen Brennstoffmixes (gelbes Segment) und der Umwandlungseffizienz (blaues Segment).

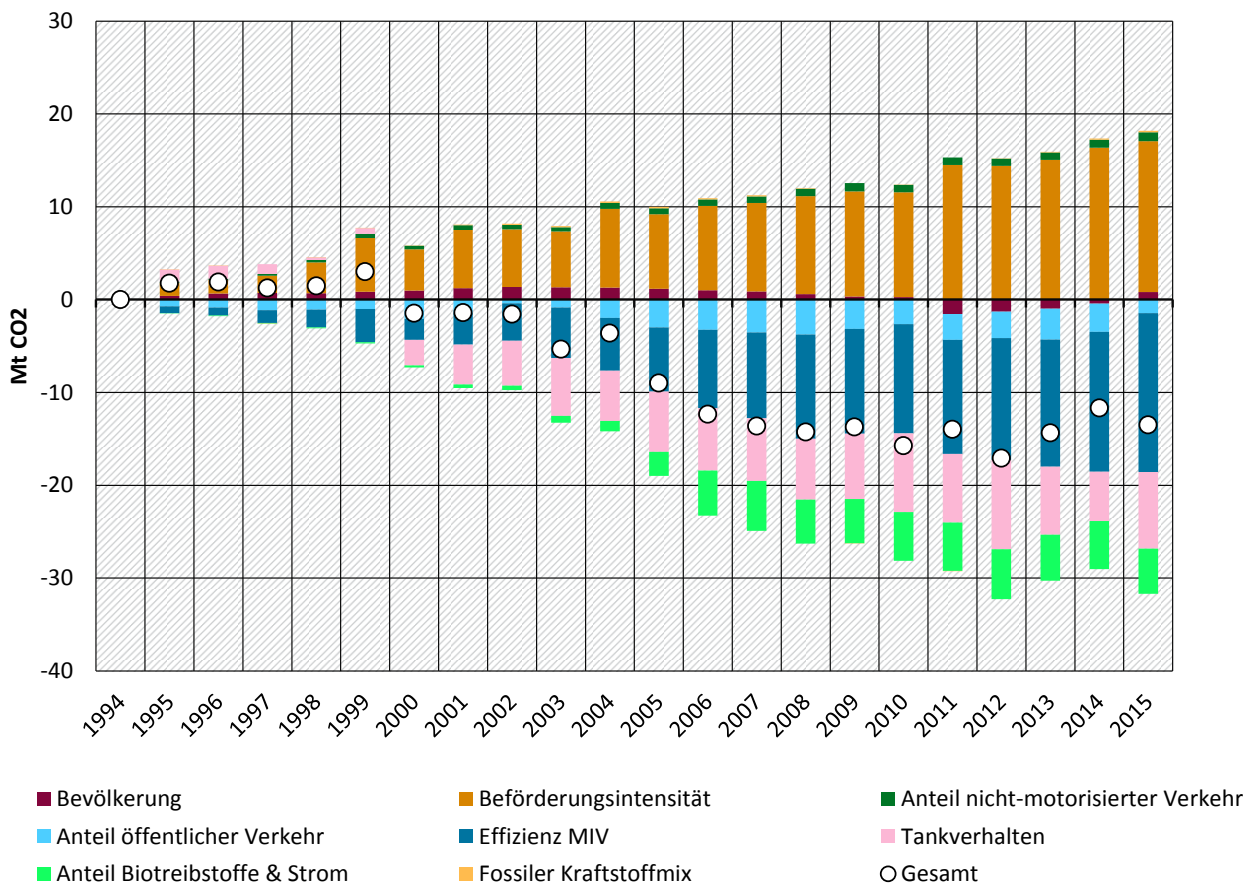
3.2.7 Personenstraßenverkehr

Abbildung 18 zeigt den Einfluss der einzelnen Treiber zur Entwicklung der Emissionen des motorisierten Individualverkehrs (MIV – PKW und Krafträder). Der zunehmende Mobilitätsbedarf, also die pro Person und Jahr zurückgelegte Strecke über alle Verkehrsträger, ist der einzige relevante Treiber, der zu einer Emissionssteigerung seit 1994 beigetragen hat. Hinzu kommt, dass der Anteil der zu Fuß oder per Fahrrad zurückgelegte Strecken leicht zurückgegangen ist. Die Energieeffizienz der Fahrzeuge wurde seit 1994 kontinuierlich verbessert und konnte die gestiegene Nachfrage nach Mobilität ausgleichen. Wie in vielen anderen Sektoren scheint es auch im Verkehrssektor einen klaren Rebound-Effekt zu geben: die möglichen Einsparungen von Treibhausgasemissionen aufgrund von gesteigener Energieeffizienz wird durch eine verstärkte Nachfrage zu großen Teilen aufgehoben. Die Einführung der sogenannten Ökosteuer (Deutscher Bundestag 1999) kann an dem Tankverhalten gut nachvollzo-

gen werden. Bis zum Ende des Jahrtausends wurde in Deutschland ungefähr so viel Kraftstoff abgesetzt wie verbraucht, d.h. es hat sich nicht gelohnt, zum Tanken ins Ausland zu fahren. Nach der Einführung der Ökosteuer ab dem Jahr 2000 kam es zu einer klaren Wende: Obwohl der Energieverbrauch des MIV gestiegen ist, wurde weniger Treibstoff im Deutschland verkauft. Im Vergleich zu 1994 werden deshalb 8,2 Mt CO₂ weniger Emissionen in Deutschland berichtet, da nach den Berichterstattungsregeln der Absatzort des Kraftstoffs über die nationale Zuordnung entscheidet (Territorialprinzip). Dabei handelt es sich aber nicht um reale Emissionsreduktionen: die in Deutschland weniger berichtete Menge an Treibhausgasen wird in den Nachbarländern zusätzlich aufgenommen. Ohne diesen Einfluss würden demnach im Jahr 2015 statt 13,5 Mt CO₂ nur 5,3 Mt CO₂ weniger Emissionen gegenüber 1994 zu verbuchen sein. Die Bevölkerungsentwicklung, der fossile Kraftstoffmix und der öffentliche Verkehr spielen nur eine untergeordnete Rolle bei der Emissionsentwicklung. Bei der Rolle des öffentlichen Verkehrs fällt auf, dass der Anteil am gesamten Mobilitätsverhalten nach Zuwächsen bis 2005 stagniert und in den letzten Jahren wieder zurückgegangen ist.

Ab dem Jahr 2000 sieht man auch erste Emissionsminderungen aufgrund der Einführung von Biotreibstoffen im Verkehrssektor. Mit der verstärkten Förderung zur Einführung von Biokraftstoffen ab 2003 ist der Einfluss deutlich gestiegen. Zukünftig wird dieser Term weitere Emissionsreduktionen zeigen, falls es zu einer breiten Marktdurchdringung von elektrischen Fahrzeugen kommen sollte. Aktuell ist der Anteil der Plug-in-Fahrzeuge zu gering, um schon in der Emissionsentwicklung erkennbar zu sein (wird deshalb nicht separat ausgewiesen).

Abbildung 18: Komponentenzerlegung der Entwicklung der CO₂-Emissionen des motorisierten Individualverkehrs seit 1994



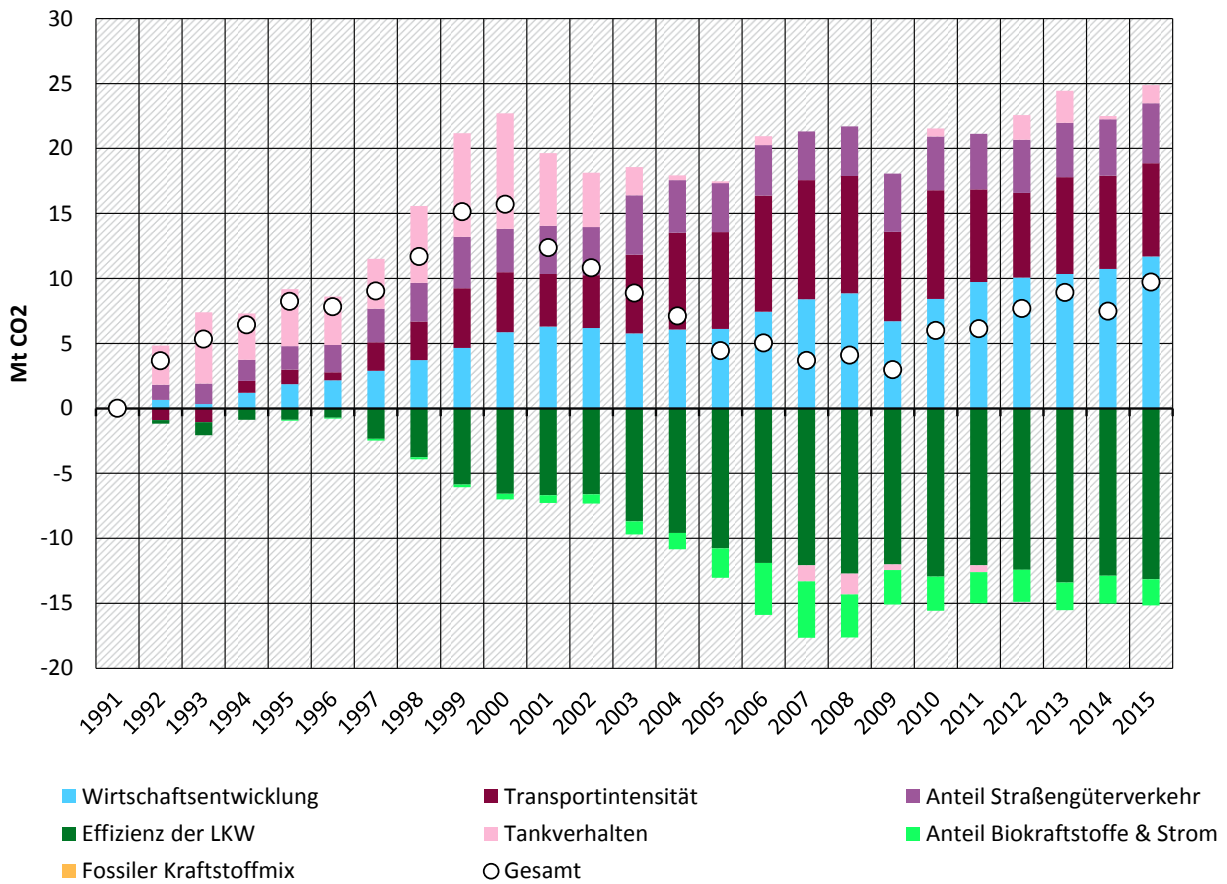
Quelle: Eigene Berechnung basierend auf StBA (2017), ifeu (2016) und UBA (2016b)¹²

3.2.8 Straßengüterverkehr

Abbildung 19 zeigt den Einfluss der einzelnen Treiber zur Entwicklung der Emissionen des Güterkraftverkehrs. Von allen untersuchten Sektoren ist dies der einzige, in dem die CO₂-Emissionen im Vergleich zu 1991 gestiegen sind. Dieses Emissionswachstum kann auf drei Gründe zurückgeführt werden: Die Wirtschaftsentwicklung, die gestiegene Transportintensität und eine Verlagerung vom Schienen- und Schiffsverkehr zum Straßengüterverkehr. Das Wachstum des BIP hatte mit einer Steigerung von knapp 12 Mt CO₂ den größten Anteil. Aber auch die Transportintensität, also die Änderung der Nachfrage nach Transportdienstleistungen im Vergleich zum Wirtschaftswachstum, ist sowohl gegenüber 1991 als auch gegenüber 2000 gestiegen. Deutschland ist damit eine Ausnahme innerhalb von Europa, wo es zumindest seit 2000 zu einer Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Transportnachfrage kam (EEA 2017b). Neben der gestiegenen Nachfrage nach Transportdienstleistungen hat auch der Straßengüterverkehr eine immer wichtigere Rolle am Gesamttransportvolumen bekommen: 1991 wurden noch 35 % aller Tonnenkilometer per Schiff und Bahn befördert, 2015 waren es nur noch 27 %. Die verbesserte Effizienz der LKW konnte die emissionssteigenden Treiber zumindest teilweise ausgleichen. 2015 wurde 30 % weniger Energie pro Tonnenkilometer als 1991 benötigt. Auch die Einführung von Biotreibstoffen und erste elektrische Lieferfahrzeuge für den Stadtverkehr konnten die Emissionen im Transportsektor leicht senken. Die Einführung der sogenannten Ökosteuern und Verteuerung des Diesels zwischen 1999 und 2003 zeigt sich klar im Tankverhalten: in den 1990er Jahren wurde im Vergleich zu 1991 deutlich mehr Kraftstoff in Deutschland getankt als verbraucht. Das Verhältnis zwischen Absatz und Verbrauch ist über die letzten Jahre gesehen mittlerweile nahezu ausgeglichen (ifeu 2016).

¹² Keine Berücksichtigung von Emissionen aus der Vorkette sowie aus direkten und indirekten Landnutzungsänderungen

Abbildung 19: Komponentenzerlegung der Entwicklung der CO₂-Emissionen des Straßengüterverkehrs seit 1991



Quelle: Eigene Berechnung basierend auf AGEB (2016a) und ifeu (2016)¹³

¹³ Keine Berücksichtigung von Emissionen aus der Vorkette sowie aus direkten und indirekten Landnutzungsänderungen.

4 Fazit und Zusammenfassung

Qualitativer Vergleich

Im ersten Teil der Untersuchung stand die Beantwortung der Frage, welche qualitativen Unterschiede und Gemeinsamkeiten THG-Inventar und Emissionsbilanz aufweisen. Es konnte gezeigt werden, dass Aufgrund von methodischen Unterschieden eine vergleichende Betrachtung von Ergebnissen beider Quellen nur begrenzt möglich ist. Da im THG-Inventar keine energieträgerspezifischen Emissionsfaktoren für die Vorkettenprodukte vorliegen, müssen diese für einen quantitativen Vergleich zunächst hergeleitet werden (siehe unten).

Manche Unterschiede wie z.B. unterschiedliche brennstoffspezifische Emissionsfaktoren sind nachgeordneter Natur und führen zu keinen grundsätzlichen Schwierigkeiten. Andere Unterschiede erschweren einen Vergleich oder machen ihn sogar unmöglich. Als wesentlich hervorzuheben sind die unterschiedlichen Betrachtungsräume. Im THG-Inventar wird nach Quellprinzip berichtet, während eine Emissionsbilanz vom Verursacherprinzip ausgeht. Daraus folgt eine unterschiedliche Behandlung ausländischer Vorkettenemissionen. Dies führt notwendigerweise zu nicht überwindbaren Unterschieden.

Darüber hinaus führen der unterschiedliche Zeitpunkt der Berichterstattung (Jahr der Emission vs. Umlage über Lebensdauer) sowie eine unterschiedliche Zuordnung verschiedener Sektoren zu grundsätzlichen Unterschieden. Diese können höchstens auf Ebene einzelner erneuerbarer Energieträger überwunden werden, was im Rahmen des Arbeitspaketes 2 exemplarisch analysiert wurde.

Quantitativer Vergleich

Im Rahmen des Arbeitspaketes 2 wurden die Unterschiede und Analogien in der Berichterstattung von Emissionen in THG-Inventar und Emissionsbilanz untersucht und quantifiziert. Dazu wurde in einem ersten Schritt zunächst eine Übersicht über die erneuerbaren Energieträger in den Sektoren Strom, Wärme und Verkehr, deren Entwicklung in den vergangenen Jahren sowie deren proportionalen Anteil an der Erzeugung erneuerbarer Energien erstellt. Aus der Fülle der Energieträger wurden die maßgeblichen identifiziert und einer genaueren Analyse unterzogen.

Um einen Vergleich der Energieträger zu ermöglichen, erfolgte zunächst die Ableitung von Emissionsfaktoren aus dem THG-Inventar. Erst dann konnte der Vergleich mit den Emissionsfaktoren der Emissionsbilanz erfolgen.

Im Bereich der **direkten Emissionen** aus der energetischen Nutzung von Biomasse sind beide Berichte weitgehend harmonisch. Für die **Hilfsenergie**, d.h. den Strommix in Deutschland, sind die Diskrepanzen weitestgehend auf die unterschiedliche Berücksichtigung der (ausländischen) Vorketten zurückzuführen. Eine Angleichung ist auf Grund der unterschiedlichen Zwecke der Berichterstattung sowie der Bezugssysteme nicht möglich.

Harmonisierungspotenziale ergeben sich vor allem im Bereich der **Vorkettenemissionen**. Im Bereich der biogenen Energieträger wurden Harmonisierungspotenziale insbesondere im Bereich Transporte und Kraftstoffe festgestellt, wobei diese bezüglich der Gesamtemissionen eine eher untergeordnete Rolle spielen.

Für den **Stromsektor** ist eine Harmonisierung der nicht-biogenen Energieerzeugungsformen aufgrund der großen Diskrepanzen in Methodik und Philosophie beider Berichtssysteme nicht möglich. Hingegen ergeben sich Harmonisierungsmöglichkeiten für die Bilanzierung der Biogasemissionen. Insbesondere betrifft dies die Emissionen aus der Gärrestlagerung. Für sonstige Emissionsquellen stimmen die Berichte teilweise bereits gut überein (Lachgasemissionen aus der Düngerausbringung), teilweise ist eine Harmonisierung nicht möglich (z.B. Herstellung des Stickstoffdüngers).

Für den **Wärmesektor** gilt dasselbe Muster: Für den nicht-biogenen Energieträger Umweltwärme kann eine vollständige Harmonisierung beider Berichtssysteme nur schwer erreicht werden. Zwar könnte der Bereich der Umweltwärme durch eine Angleichung der Strommixe einheitlicher gestaltet werden. Jedoch bleibt der Großteil der materialspezifischen Emissionen im THG-Inventar auch weiterhin nicht ausweisbar. Für die feste Biomasse liegen die Emissionen weit weniger auseinander, so dass eine Harmonisierung nicht notwendig ist.

Eine Harmonisierung des Einsatzes biogener Energieträger im **Verkehrssektor** erscheint vor dem Hintergrund der durchgängig unterschiedlichen Quellen in beiden Berichtssystemen zum jetzigen Zeitpunkt nur schwer möglich. Die Emissionsbilanz nutzt Werte, die im Rahmen der Erneuerbaren Energien-Richtlinie erhoben werden und die sich aus Standardwerten sowie von den Wirtschaftsakteuren selbst berechneten Werten zusammensetzen. Aufgrund der mangelnden Transparenz der selbst berechneten Werte besteht lediglich die Möglichkeit der Anpassung der Standardwerte. Es ist jedoch fraglich, ob und wann eine offizielle Überarbeitung der Standardwerte erfolgen wird.

Zusammenfassend ergaben sich Spielräume der Harmonisierung im Bereich biogene Energieträger in den Sektoren Strom und Wärme, wohingegen die Möglichkeiten für nicht-biogene Energieträger in allen drei Sektoren aufgrund der unterschiedlichen Philosophie in Kombination mit weitestgehend emissionslosem Anlagenbetrieb, niedrigem Hilfsenergiebedarf (Ausnahme Umweltwärme) und der Dominanz der materialspezifischen Berechnungsfaktoren, eingeschränkt sind.

Komponentenzerlegung

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes erfolgte eine Analyse des Beitrags erneuerbarer Energien zur Emissionsreduktion in Deutschland auf Basis von Komponentenzerlegungen. Damit wird folgender Herausforderung begegnet: Trotz deutlich steigender Anteile erneuerbarer Energien in den meisten Sektoren und insbesondere in der Stromerzeugung zeigen sich im deutschen Treibhausgasinventar nicht die entsprechenden Emissionsminderungen. Gründe dafür sind parallel stattfindende Entwicklungen, die gleichzeitig emissionssteigernd wirken (wie z.B. Anstieg des Stromverbrauchs). In Summe können deshalb die Emissionen stagnieren oder zeitweilig sogar steigen, obwohl der Anteil erneuerbarer Energien deutlich wächst und Emissionen vermieden werden, die bei einer Nutzung anderer Technologien entstanden wären.

Die Komponentenzerlegung ist ein Werkzeug, mit dem die Wirkungen aller relevanten Treiber auf die Emissionen quantifiziert und den einzelnen Treibern zugeordnet werden. Damit können auch die tatsächlichen emissionsmindernden Beiträge erneuerbarer Energien „sichtbar“ gemacht werden. Ebenso werden damit die emissionssteigernden oder emissionsmindernden Beiträge anderer Treiber messbar. Der Beitrag der erneuerbaren Energien kann so in einem Gesamtkontext der Emissionsentwicklung abgebildet werden.

Komponentenzerlegungen wurden für die folgende Abgrenzungen durchgeführt: gesamte Treibhausgasemissionen, energiebedingte CO₂-Emissionen, CO₂-Emissionen des Stroms, der Industriewärme, der Räumwärme, der Fernwärme, des motorisierten Individualverkehrs, sowie des Straßengüterverkehrs.

Für die Wirkung der erneuerbaren Energien auf die energiebedingten CO₂-Emissionen, die 80 % der gesamten THG-Emissionen ausmachen, lässt sich festhalten: Von 1990 bis 2015 sanken die energiebedingten CO₂-Emissionen um knapp 25 %, das entspricht 245 Mio. t. Während es parallel auch emissionssteigernde Effekte gab (allen voran der steigende Wohlstand gemessen in BIP/Person), haben die erneuerbaren Energien mit 127 Mio. t. CO₂ zur Emissionsminderung in diesem Zeitraum beigetragen.

Besonders groß ist der Beitrag der erneuerbaren Energien zur Emissionsminderung im Stromsektor, insgesamt 137 Mio. t CO₂ werden durch ihren Ausbau zwischen 1990 und 2015 vermieden. Da es aber

im Zeitraum seit 1990 auch emissionssteigernde Effekte wie z.B. den Anstieg des Stromverbrauchs, den starken Anstieg der Exporte und den Atomausstieg gab, fällt die Emissionsminderung im Stromsektor insgesamt mit nur ca. 50 Mio. t im Saldo deutlich geringer aus.

In den Wärmesektoren führt der Einsatz erneuerbarer Energieträger zu sehr unterschiedlich großen Anteilen an der im Betrachtungszeitraum erzielten gesamten Emissionsminderung. Bei der Industriewärme, deren Emissionen von 1990 bis 2015 um 45% oder 80 Mio. t CO₂ erheblich sanken, trugen erneuerbare Energien nur mit 9 Mio.t zu dieser Minderung bei. In der Raumwärme ist eine Emissionsminderung um 32% oder 41 Mio. t CO₂ zu verzeichnen, davon gehen immerhin 16 Mio. t auf das Konto der erneuerbaren Energien. In den beiden genannten Sektoren der Wärmeversorgung sind es eher Effizienzsteigerungen, die zu weniger CO₂-Emissionen geführt haben, und den emissionsmindernden Treibern stehen auch emissionssteigernde Effekte gegenüber. Insbesondere eine höhere Nachfrage hat die Emissionen nach oben getrieben. Im dritten betrachteten Bereich der Wärmeversorgung, der Fernwärme, sind die erzielten Emissionsminderungen seit 1990 mit insgesamt nur ca. 7 Mio. t CO₂ vergleichsweise gering, dafür sind die erneuerbaren Energien mit rund 5 Mio.t relativ prominent an dieser Einsparung beteiligt.

Im Verkehrssektor ist aktuell der Einfluss der erneuerbaren Energien auf die Verwendung von Biotreibstoffen beschränkt und von untergeordneter Rolle (Emissionsminderungsbeitrag in 2015 von 4,9 Mio. t CO₂ für den Personenverkehr und 2,0 Mio. t CO₂ für den Güterstraßenverkehr). Zukünftig könnte der Einfluss durch eine breite Markteinführung der Elektromobilität relevant werden. Die Nachfrage nach Transportdienstleistungen und verbesserte Effizienz der Fahrzeuge sind sowohl für den Personen- als auch den Güterverkehr die wichtigsten Treiber.

Mit der hier vorgestellten Methodik liegt nun ein Werkzeug vor, mit dem der Einfluss der erneuerbaren Energien auf die Emissionen in einem bestimmten Sektor und für einen gegebenen Zeitraum quantifiziert werden kann. Gleichzeitig kann die Wirkung der erneuerbaren Energien im Vergleich mit anderen, auch gegenläufigen Treibern, messbar und damit sichtbar gemacht werden.

5 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

Zunächst wurden im Rahmen dieser Studie qualitative Unterschiede zwischen der Emissionsbilanz und dem THG-Inventar identifiziert. Anhand von Beispielen wurde aufgezeigt, welche Auswirkungen dies auf eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse hat. Es gibt einige Stellen, an denen eine Harmonisierung möglich erscheint. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn Ergebnisse im Wesentlichen deswegen unterschiedlich sind, weil sich Datengrundlagen unterscheiden (wie z.B. im Fall der biogenen Energieträger). Schwieriger wird es in den Fällen, in denen die Unterschiede in der Methodik bedingt sind, beispielsweise, wenn Vorkettenemissionen hauptsächlich im Ausland anfallen.

Zielführende künftige Aktivitäten könnten darin bestehen, aktiv darauf hinzuwirken, dass Datenquellen, wo möglich, harmonisiert werden. Dazu könnte auf Basis der im Rahmen dieses Projektes generierten Erkenntnisse Gesprächsrunden mit relevanten Akteuren ein hilfreicher Schritt sein. Darüber hinaus könnte eine weitere zielgerichtete Darstellung der Unterschiede dazu beitragen, das interessierte Publikum darüber zu informieren, dass Emissionsbilanz und THG-Inventar notwendigerweise Unterschiede aufweisen. Informationsmaterialien aus dem vorliegenden Projekt können für unterschiedliche Zielgruppen weiterentwickelt werden, um eine möglichst passgenaue Ansprache zu ermöglichen.

Im Rahmen dieser Studie wurden darüber hinaus die CO₂-Emissionen und deren Treiber in unterschiedlicher Sektoren (Stromerzeugung, Industrie-, Raum- und Fernwärme sowie Personenstraßen- und Straßengüterverkehr) unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses erneuerbarer Energieträger untersucht. Durch die unterschiedlichen Abgrenzungen (Berücksichtigung von Primärenergieeinsatz oder nur Endenergieverbrauch, Zuordnung Atomstrom) kann der Minderungsbeitrag der erneuerbaren Energien der einzelnen Sektoren nicht summiert werden. Dies ist auch der Grund, warum der Einfluss der erneuerbaren Energien im Stromsektor höher ausfällt, als bei der Makro-Analyse der energiebedingten CO₂-Emissionen. Dies sollte im Rahmen weiterer Untersuchungen harmonisiert werden, damit die Sektorergebnisse untereinander vergleichbar werden.

Aufgrund von Datenlücken konnte der Einfluss erneuerbarer Energieträger auf die CO₂-Emissionen in gewerblichen Gebäuden nicht untersucht werden. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf, um Datenlücken hinsichtlich der Gebäudeflächen in Gewerbegebäuden zu schließen. Ebenso wurden im Rahmen dieser Studie nicht die Einflussfaktoren auf CO₂-Emissionen des Verkehrs außerhalb des Straßenverkehrs untersucht. Insbesondere die CO₂-Emissionen des Luftverkehrs sind in den letzten Jahren sehr stark angestiegen, so dass eine Analyse der zugrundeliegenden Treiber notwendig erscheint. Neben CO₂-Emissionen aus der Verbrennung entstehen auch Treibhausgasemissionen bei der Förderung, dem Transport und der Verteilung fossiler Energieträger. Auch diese Emissionen werden durch den Ausbau der erneuerbaren Energien reduziert, wurden aber im Rahmen dieses Vorhabens nicht analysiert.

Da die Ausgangsfragestellung dieser Studie sich auf den Einfluss des Ausbaus erneuerbarer Energien auf die deutschen Treibhausgasemissionen bezog, wurden hier nur die CO₂-Emissionen in Energiesektoren untersucht. Treibhausgasemissionen entstehen aber auch in anderen Bereichen, beispielsweise in der Landwirtschaft, in der Abfallwirtschaft und im Bereich Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF), sowie in nicht direkt mit dem Energieverbrauch verbundenen Industrieprozessen. Die Emissionen dieser Sektoren machen etwa 15 % der Gesamtemissionen aus, sind also auch für die Entwicklung der Gesamtemissionen Deutschlands wichtig. Diese Emissionen sollten ebenfalls mit der Methode der Komponentenzerlegung untersucht werden, um noch mehr Erkenntnisse über die Gesamtemissionsentwicklung und deren Treiber in den verschiedenen Bereichen zu erhalten. Forschungsbedarf besteht dann insbesondere darin, die geeigneten Treiber zu identifizieren und gegebenenfalls entsprechende Daten zu sammeln. Möglicherweise lassen sich hier auch indirekte Effekte

erneuerbarer Energien wie beispielsweise die Auswirkung von Biomassenutzung auf Landwirtschaft und Landnutzungsänderungen abbilden.

Aktuell wurde in der Komponentenzerlegung im Bereich der Wärme keine Witterungskorrektur vorgenommen. Da die Witterung der Emissionen beeinflusst, könnte sie ggf. als eigener Treiber berücksichtigt werden. Im Rahmen dieses Vorhabens wurde dies versucht, konnte aber auf Grund der Rahmenbedingungen nicht finalisiert werden. Es gibt verschiedene Methoden zur Witterungskorrektur, diese könnten in der Zukunft untersucht werden. Bei der resultierenden Komponentenzerlegung ist dann zu berücksichtigen, dass die Witterung dann nicht mehr, auch nicht implizit, als Treiber der Emissionen berücksichtigt wird.

Vor dem Hintergrund der Energiewende erscheint es sinnvoll, neuere Basisjahre als 1990 zu wählen (z.B. 2010) um mehr darüber zu erfahren, was die aktuellen Entwicklungen sind, die signifikant zur Emissionsentwicklung beitragen.

6 Quellenverzeichnis

- AGEE-Stat (2017). Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland.
- Ang, B. W. (2004). Decomposition analysis for policymaking in energy. *Energy Policy* 32 (9), S. 1131–1139.
- Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB) (2016a): Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland 1990-2015 (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB), Hrsg.). Verfügbar unter http://www.ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=Auswertetabellen%20Energiebilanz%20ausw_28072016_ovk.xlsx.
- Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB) (2016b): Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland, AGEB. Verfügbar unter <http://www.ag-energiebilanzen.de/7-0-Bilanzen-1990-2014.html>.
- Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB) (2017): Bruttostromerzeugung in Deutschland ab 1990 nach Energieträgern.
- atw – Internationale Zeitschrift für Kernenergie (2008): Kernkraftwerke in Deutschland. Betriebsergebnisse 2007.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2016): Erneuerbare Energien in Zahlen. Nationale und internationale Entwicklung im Jahr 2015. Verfügbar unter https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/Berichte/erneuerbare-energien-in-zahlen-2015.pdf?__blob=publicationFile&v=7.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2017): Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland. unter Verwendung von Daten der unter Verwendung von Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat).
- Bundesrepublik Deutschland (BRD) (2016): Fortschrittsbericht nach Artikel 22 der Richtlinie 2009/28/EG zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (Ref. Ares(2016)844123). Verfügbar unter <https://ec.europa.eu/energy/node/70>, zuletzt abgerufen am 17.10.2016.
- Centre for Life Cycle Inventories (Centre for Life Cycle Inventories, Hrsg.) (2016): ecoinvent. Verfügbar unter <http://www.ecoinvent.org/>.
- Colinet Carmona, María J. & Román Collado, Rocío (2016). LMDI decomposition analysis of energy consumption in Andalusia (Spain) during 2003–2012: the energy efficiency policy implications. *Energy Efficiency* 9 (3), S. 807–823.
- Dai Ying; Zhu Jing & Song Han (2015). Using LMDI approach to analyze changes in carbon dioxide emissions of China's logistics industry. *Journal of Industrial Engineering and Management* 2015 (8 (3)). Verfügbar unter <http://www.jiem.org/index.php/jiem/article/view/1443>.
- Deutscher Bundestag (1999). Gesetz zum Einstieg in die ökologische Steuerreform (Bundesgesetzblatt (BGBl) Teil I Nr. 14, 1999, S. 378), abgerufen am 02.11.2017.
- EU (2009a). RICHTLINIE 2009/28/EG 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 (OJ L 140, 05.06.2009, S. 16). Verfügbar unter <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0028&from=EN>, abgerufen am 15.08.2014.
- EU (2013). VERORDNUNG (EU) Nr. 525/2013 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 21. Mai 2013 über ein System für die Überwachung von Treibhausgasemissionen sowie für die Berichterstattung über diese Emissionen und über andere klimaschutzrelevante Informationen auf Ebene der Mitgliedstaaten und der Union und zur Aufhebung der Entscheidung Nr. 280/2004/EG (OJ L 165, 18.06.2013, S. 13). Verfügbar unter <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32013R0525&from=EN>, abgerufen am 14.08.2014.
- European Commission (EC) (2016): Progress reports, DG ENER. Verfügbar unter <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/renewable-energy/progress-reports>, zuletzt abgerufen am 17.10.2016.
- European Environment Agency (EEA) (2014): Why did greenhouse gas emissions decrease in the EU between 1990 and 2012? (European Environment Agency (EEA), Hrsg.), Copenhagen. Verfügbar unter <http://www.eea.europa.eu/publications/why-are-greenhouse-gases-decreasing>.
- European Environment Agency (EEA) (2015a): Evaluating 15 years of transport and environmental policy integration. TERM 2015: Transport indicators tracking progress towards environmental targets in Europe (European Environment Agency (EEA), Hrsg.) (EEA Report 7/2015). Copenhagen: European Environment Agency (EEA). Verfügbar unter <http://www.eea.europa.eu/publications/term-report-2015>, zuletzt abgerufen am 17.10.2016.
- European Environment Agency (EEA) (2015b): Trends and projections in Europe 2015. Tracking progress towards Europe's climate and energy targets (European Environment Agency (EEA), Hrsg.). European Environment Agency (EEA).
- European Environment Agency (EEA) (2017a): Analysis of key trends and drivers in greenhouse gas emissions in the EU between 1990 and 2015 (European Environment Agency (EEA), Hrsg.). Verfügbar unter <https://www.eea.europa.eu/publications/analysis-of-key-trends-and>.
- European Environment Agency (EEA) (2017b): Freight transport demand. Freight transport grew considerably in the EU - 28 between 2000 and 2007. Indicator Assessment (European Environment Agency (EEA), Hrsg.), Copenhagen. Verfügbar

unter https://www.eea.europa.eu/ds_resolveuid/9e5c6c8a592e459aa1857f10f78c0719, zuletzt abgerufen am 03.11.2017.

- European Union (EU) (2009b). Decision No 406/2009/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the effort of Member States to reduce their greenhouse gas emissions to meet the Community's greenhouse gas emission reduction commitments up to 2020 (OJ L 140, 05.06.2009, S. 136). Verfügbar unter <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0136:0148:EN:PDF>, abgerufen am 05.08.2014.
- Fernández González, P.; Landajo, M. & Presno, M. J. (2014). Multilevel LMDI decomposition of changes in aggregate energy consumption. A cross country analysis in the EU-27. *Energy Policy* 68 (Supplement C), S. 576–584.
- Förster, Hannah; Schumacher, Katja; de Cian, Enrica; Hübler, Michael; Keppo, Ilkka; Mima, Silvana & Sands, Ronald D. (2013). European Energy Efficiency and Decarbonization Strategies beyond 2030: A Sectoral Multi-Model Decomposition. *Climate Change Economics* 04 (supp01), S. 1340004. Verfügbar unter 10.1142/S2010007813400046.
- ForWind & Öko-Institut e.V. (2016): Daten zur Einspeisung erneuerbarer Energien. Verfügbar unter <https://www.oeko.de/aktuelles/2016/daten-zur-einspeisung-erneuerbarer-energien/>, zuletzt abgerufen am 08.12.2016.
- Fraunhofer ISE (2018): Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland, Freiburg. Verfügbar unter <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf>.
- IINAS (2013): GEMIS 4.8. Verfügbar unter <http://www.iinas.org/gemis-de.html>.
- Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (ifeu) (2016): TREMOD - Transport Emission Model. Version 5.64. nicht veröffentlicht: Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (ifeu).
- Institut für Wohnen und Umwelt (IWU) & Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (Fraunhofer IFAM) (2016): Monitoring der KfW-Programme „Energieeffizient Sanieren“ und „Energieeffizient Bauen“ 2015. Verfügbar unter https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/Konzernthemen/Research/PDF-Dokumente-alle-Evaluationen/Monitoringbericht_EBS_2015.pdf.
- IPCC, Jim Penman, Michael Gytarsky, Taka Hiraishi, William Irving, and Thelma Krug (Mitarbeiter) (2006): Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Verfügbar unter <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>.
- Karl R. Haapala & Preedanood Prempreeda (2014). Comparative life cycle assessment of 2.0 MW wind turbines. *Int. J. Sustainable Manufacturing* (Vol. 3, No. 2), S. 170–185.
- Kunze, Sabine & Fehrenbach, Horst (2011): Erweiterung der Treibhausgas-Bilanzen ausgewählter Biokraftstoffpfade (Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien - Statistik (AGEE-Stat) & Umweltbundesamt (UBA), Hrsg.).
- Öko-Institut e.V. (2012): Komponentenzerlegung der Umlage zur Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien über das Erneuerbare Energien Gesetz (Öko-Institut e.V., Hrsg.). Öko-Institut e.V., zuletzt abgerufen am 01.12.2015.
- Statistisches Bundesamt (StBA) (2017): Bevölkerung: Deutschland, Stichtag. Statistik 12411, Fortschreibung des Bevölkerungsstandes, Wiesbaden, zuletzt abgerufen am 12.09.2017.
- Umweltbundesamt (2016). Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2016. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2014.
- Umweltbundesamt (2017). Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger - Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2015.
- Umweltbundesamt (UBA) (2016a): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2016. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2014. Umweltbundesamt (UBA).
- Umweltbundesamt (UBA) (2016b): Zentrales System Emissionen (Umweltbundesamt (UBA), Hrsg.). Dessau-Roßlau.
- Umweltbundesamt (UBA) (2017a). Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger - Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2016. *Climate Change* 2017 (23). Verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-10-26_climate-change_23-2017_emissionsbilanz-ee-2016.pdf.
- Umweltbundesamt (UBA) (2017b): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2017. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2015 (*Climate Change* 13/2017), Dessau-Roßlau. Verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/berichterstattung-unter-der-klimarahmenkonvention-2>, zuletzt abgerufen am 27.10.2017.

7 Annex: Datenquellen

Tabelle 5: Datenquellen für die Komponentenzerlegung

Sektor	Datensatz	Datenquelle
Makro (THG-Emissionen)	Bevölkerung	StBA (2017)
	Bruttoinlandsprodukt	AGEB (2016a)
	Primärenergieverbrauch (ohne nicht-energetischer Verbrauch, ohne intern. Flugverkehr)	AGEB (2016a), UBA (2016b)
	Endenergieverbrauch (ohne intern. Flugverkehr)	AGEB (2016a), UBA (2016b)
	Gesamte Treibhausgasemissionen (ohne intern. Flugverkehr; ohne LULUCF)	UBA (2016b)
Makro (energiebedingtes CO ₂)	Bevölkerung	StBA (2017)
	Bruttoinlandsprodukt	AGEB (2016a)
	Endenergieverbrauch (ohne intern. Flugverkehr)	AGEB (2016a), UBA (2016b)
	Endenergieverbrauch nicht erneuerbar (ohne intern. Flugverkehr)	AGEB (2016a), UBA (2016b)
	Energiebedingte CO ₂ -Emissionen (CRF 1)	UBA (2016b)
CO ₂ -Emissionen der Stromerzeugung	Endenergieverbrauch Strom	AGEB (2016b)
	Brutto-Inlandsstromverbrauch	AGEB (2017)
	Bruttostromerzeugung	AGEB (2017)
	Bruttostromerzeugung der fossilen Energieträger	AGEB (2017)
	Fossiler Brennstoffeinsatz in Kraftwerken	UBA (2016b)
	CO ₂ -Emissionen aus fossilen Brennstoffen in Kraftwerken	UBA (2016b)
	Bruttostromerzeugung aus Kernenergie	AGEB (2017)
	Bruttostromerzeugung aus erneuerbaren Energien	BMWi (2017)
	Stromausgleichsbeitrag mit dem Ausland (Importe positiv)	AGEB (2017)
CO ₂ -Emissionen der Industriewärme	Bruttoinlandsprodukt	AGEB (2016a)
	Bruttoproduktionswert der Industrie	AGEB (2016a)
	Endenergieverbrauch ohne Strom	AGEB (2016a), UBA (2016b)
	Fossiler Endenergieverbrauch	UBA (2016b)
	CO ₂ -Emissionen der Industrie aus fossilen Brennstoffen	UBA (2016b)
CO ₂ -Emissionen	Bevölkerung	StBA (2017)
	Wohnfläche	AGEB (2016a)

Sektor	Datensatz	Datenquelle
	Endenergieverbrauch der privaten Haushalte ohne Strom	AGEB (2016a)
	Fossiler Endenergieverbrauch der privaten Haushalte ohne Strom	AGEB (2016a)
	CO ₂ -Emissionen der privaten Haushalte	UBA (2016b)
CO ₂ -Emissionen der Fernwärme	Fernwärmeerzeugung	AGEB (2016b)
	Leistungsverluste Fernwärme	AGEB (2016b)
	Fossiler Primärenergieeinsatz zur Fernwärmeerzeugung	UBA (2016b)
	Biogener Primärenergieeinsatz zur Fernwärmeerzeugung	UBA (2016b)
	Primärenergieeinsatz sonstiger erneuerbarer Energieträger zur Fernwärmeerzeugung	AGEB (2016b)
	Nuklearer Primärenergieeinsatz zur Fernwärmeerzeugung	AGEB (2016b)
CO ₂ -Emissionen des Personenstraßenverkehrs	Bevölkerung	StBA (2017)
	Personenverkehrsleistung (gesamt)	ifeu (2016)
	Personenverkehrsleistung (motorisiert)	ifeu (2016)
	Verkehrsleistung motorisierter Individualverkehr (MIV)	ifeu (2016)
	Endenergieverbrauch MIV	ifeu (2016)
	Treibstoffabsatz MIV	ifeu (2016)
	fossiler Treibstoffabsatz MIV	ifeu (2016)
	CO ₂ -Emissionen MIV	UBA (2016b)
CO ₂ -Emissionen des Straßengüterverkehrs	Bruttoinlandsprodukt	AGEB (2016a)
	Güterverkehrsleistung (gesamt)	ifeu (2016)
	Güterverkehrsleistung (LKW)	ifeu (2016)
	Endenergieverbrauch (LKW)	ifeu (2016)
	Treibstoffabsatz (LKW)	ifeu (2016)
	fossiler Treibstoffabsatz (LKW)	ifeu (2016)
	CO ₂ Emissionen (LKW)	ifeu (2016)

Quelle: Eigene Darstellung