

CLIMATE CHANGE

15/2018

Komponentenzerlegung energiebedingter Treibhausgasemissionen mit Fokus auf dem Ausbau erneuerbarer Energien

Teilbericht 3: Dekomposition der energiebedingten
THG-Emissionen Deutschlands

CLIMATE CHANGE 15/2018

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3715 411 16 0

Komponentenzerlegung energiebedingter Treibhausgasemissionen mit Fokus auf dem Ausbau erneuerbarer Energien

Teilbericht 3: Dekomposition der energiebedingten THG-Emissionen
Deutschlands

von

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

Horst Fehrenbach, Nabil Abdalla, Wolfram Knörr
ifeu, Heidelberg

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber:

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

 /umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt

Durchführung der Studie:

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

Abschlussdatum:

Juni 2018

Redaktion:

Fachgebiet I 2.5 Energieversorgung und -daten,
Geschäftsstelle der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat)
Dr. Thomas Lauf

Publikationen als pdf:

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

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, Juni 2018

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

Kurzbeschreibung

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes erfolgt eine Analyse des Beitrages erneuerbarer Energien zur Emissionsreduktion in Deutschland auf Basis von Dekompositionsanalysen. Damit wird folgender Herausforderung begegnet: Der steigende Anteil erneuerbarer Energien in einigen Bereichen (z.B. bei der Stromerzeugung) wird nicht direkt im deutschen Treibhausgasinventar reflektiert. Gründe dafür sind beispielsweise parallel stattfindende Entwicklungen, die gleichzeitig emissionssteigernd (z.B. Atomausstieg) als auch senkend (Zubau erneuerbarer Stromerzeugungskapazität) wirken können. In Summe können deshalb die Emissionen stagnieren oder zeitweilig sogar steigen, obwohl der Anteil erneuerbarer Energien deutlich wächst und Emissionen vermeidet, die bei einer Nutzung anderer Technologien entstehen würden.

Die Dekompositionsanalyse ist ein Werkzeug mit dem die tatsächlichen emissionsmindernden Beiträge erneuerbarer Energien „sichtbar“ gemacht werden können. Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wird sie daher angewendet um den Beitrag der erneuerbaren Energien zur Emissionsentwicklung messbar zu machen und in einem Gesamtkontext der Emissionsentwicklung abzubilden. Diese Analyse erfolgt für die folgende Bereiche: gesamte Treibhausgasemissionen, energiebedingte CO₂-Emissionen, CO₂-Emissionen des Stroms, der Industriewärme, der Räumwärme, der Fernwärme, des motorisierten Individualverkehrs, sowie dem Straßengüterverkehr.

Abstract

Within this work-package, an analysis of the contribution of renewable energy sources to emission reductions in Germany is carried out on the basis of decomposition analyses. This is done in order to overcome the following challenge: The increasing deployment of renewable energy sources in some areas (e. g. electricity generation) is not directly reflected in the German greenhouse gas inventory. Reasons for this are, for example, developments which take place in parallel and which can simultaneously increase emissions (e. g. the phasing out of nuclear energy) and reduce emissions (e. g. the expansion of renewable power generation capacity). Emissions can therefore stagnate or even rise temporarily, although the deployment of renewable energy sources increases significantly and emissions that would be generated if other technologies were used are thus avoided.

Decomposition analysis is a method which can be used to “reveal” the emission-reducing contributions of renewable energies. Within this work package, it is therefore applied to quantify the contribution of renewable energies to emission development and to reflect this in an overall context of emission development. This analysis is carried out in the following areas: total greenhouse gas emissions, energy-related CO₂-emissions, CO₂-emissions from electricity, industrial heat, space heating, district heating, private motorised transport and road freight transport.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	7
Abkürzungsverzeichnis	8
1 Zielsetzung und Aufbau	10
2 Methodischer Ansatz	11
2.1 Einführung in die Komponentenzerlegung	11
2.2 Festlegung des Betrachtungsraums.....	13
2.3 Datenquellen	14
3 Sektorbetrachtung.....	17
3.1 Die Makroebene: gesamte Treibhausgasemissionen	17
3.1.1 Identifikation der Treiber	17
3.1.2 Ergebnisse	18
3.1.2.1 Analyse gegenüber 1990	18
3.1.2.2 Jahr-auf-Jahr Analyse	19
3.2 Makroebene: Energiebedingte CO ₂ -Emissionen.....	21
3.2.1 Ergebnisse	22
3.2.1.1 Analyse gegenüber 1990	22
3.2.1.2 Jahr-auf-Jahr-Analyse	23
3.3 Strom	24
3.3.1 Identifikation der Treiber	24
3.3.1.1 Disaggregation der nicht-fossilen Treiber	25
3.3.2 Ergebnisse	26
3.3.2.1 Analyse gegenüber 1990	26
3.3.2.2 Jahr-auf-Jahr-Analyse	28
3.4 Industrierwärme.....	31
3.4.1 Identifikation der Treiber	31
3.4.2 Ergebnisse	32
3.4.2.1 Analyse gegenüber 1990	32
3.4.2.2 Jahr-auf-Jahr-Analyse	33
3.5 Raumwärme.....	34
3.5.1 Identifikation der Treiber	34
3.5.2 Ergebnisse	36
3.5.2.1 Analyse gegenüber 1990	36

3.5.2.2	Jahr-auf-Jahr-Analyse	37
3.6	Fernwärme.....	38
3.6.1	Identifikation der Treiber.....	38
3.6.2	Ergebnisse.....	40
3.6.2.1	Analyse gegenüber 2003	40
3.6.2.2	Jahr-auf-Jahr-Analyse	41
3.7	Personenstraßenverkehr.....	42
3.7.1	Identifikation der Treiber.....	42
3.7.2	Ergebnisse.....	43
3.7.2.1	Analyse gegenüber 1994	43
3.7.2.2	Jahr-auf-Jahr-Analyse	45
3.8	Straßengüterverkehr.....	46
3.8.1	Identifikation der Treiber.....	46
3.8.2	Ergebnisse.....	47
3.8.2.1	Analyse gegenüber 1991	47
3.8.2.2	Jahr-auf-Jahr-Analyse	48
4	Quellenverzeichnis.....	50

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Skizze des Betrachtungsraumes entsprechend der aktuellen Emissionsanteile	14
Abbildung 2:	Komponentenzerlegung der Entwicklung der THG-Emissionen seit 1990	18
Abbildung 3:	Komponentenzerlegung der jährlichen Entwicklung der THG-Emissionen	20
Abbildung 4:	Veränderung des Energieträgermix gegenüber dem Vorjahr	20
Abbildung 5:	Komponentenzerlegung der energiebedingten CO ₂ -Emissionen seit 1990	22
Abbildung 6:	Komponentenzerlegung der jährlichen Entwicklung der energiebedingten CO ₂ -Emissionen	23
Abbildung 7:	Komponentenzerlegung der CO ₂ -Emissionen des Stroms seit 1990 (erneuerbare Energien zusammengefasst)	27
Abbildung 8:	Komponentenzerlegung der CO ₂ -Emissionen des Stroms seit 1990 (erneuerbare Energien einzeln dargestellt).....	28
Abbildung 9:	Komponentenzerlegung der jährlichen Entwicklung der CO ₂ -Emissionen des Stroms (erneuerbare Energien zusammengefasst) ..	30
Abbildung 10:	Komponentenzerlegung der CO ₂ -Emissionen der Industrierwärme seit 1990	32
Abbildung 11:	Komponentenzerlegung der jährlichen Entwicklung der CO ₂ -Emissionen der Industrierwärme.....	34
Abbildung 12:	Komponentenzerlegung der Entwicklung der CO ₂ -Emissionen der Raumwärme seit 1990.....	36
Abbildung 13:	Endenergieverbrauch der Haushalte (ohne Strom) im Vergleich zur Witterung seit 1990	38
Abbildung 14:	Komponentenzerlegung der Entwicklung der CO ₂ -Emissionen der Fernwärme seit 2003	40
Abbildung 15:	Komponentenzerlegung der jährlichen Entwicklung der CO ₂ -Emissionen der Fernwärme	41
Abbildung 16:	Fernwärmennachfrage im Vergleich zur Witterung seit 2003	42
Abbildung 17:	Komponentenzerlegung der Entwicklung der CO ₂ -Emissionen des motorisierten Individualverkehrs seit 1994	44
Abbildung 18:	Komponentenzerlegung der jährlichen Entwicklung der CO ₂ -Emissionen des motorisierten Individualverkehrs	45
Abbildung 19:	Komponentenzerlegung der Entwicklung der CO ₂ -Emissionen des Straßengüterverkehrs seit 1991	48
Abbildung 20:	Komponentenzerlegung der jährlichen Entwicklung der CO ₂ -Emissionen des Straßengüterverkehrs seit 1991	49

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Datenquellen für die Komponentenzerlegung	15
------------	---	----

Abkürzungsverzeichnis

AbsatzLKW_{DE}	Absatz von Treibstoffen an den Straßengüterverkehr in Deutschland
AbsatzLKW_{DE fossil}	Absatz von fossilen Treibstoffen an den Straßengüterverkehr in Deutschland
AbsatzMIV_{DE}	Absatz von Treibstoffen an den motorisierten Individualverkehr in Deutschland
AbsatzMIV_{DE fossil}	Absatz von fossilen Treibstoffen an den motorisierten Individualverkehr in Deutschland
AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.
AGEE-Stat	Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik
A_{Bio}	Anteil Bioenergie am Strommix
A_{nukl}	Anteil Nuklearenergie am Strommix
A_{PV}	Anteil Photovoltaik am Strommix
A_{Wind}	Anteil Windenergie am Strommix
BE_{fossil}	Fossiler Brennstoffeinsatz
Bev	Bevölkerung
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BMUB	Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BPW	Bruttoproduktionswert der Industrie
BrStrErz	Bruttostromerzeugung
BrStrV	Bruttostromverbrauch
CO₂	Kohlenstoffdioxid
CO₂ Energie	Energiebedingte CO ₂ -Emissionen
CO₂ Fernwärme	CO ₂ -Emissionen der Fernwärmebereitstellung
CO₂ LKW	CO ₂ -Emissionen des LKW-Verkehrs
CO₂ MIV	CO ₂ -Emissionen des motorisierten Individualverkehrs
CO₂ Raumwaerme	CO ₂ -Emissionen der Wärmeversorgung der Wohngebäude ohne Fernwärme
CO₂ Strom	CO ₂ -Emissionen der Stromerzeugung
CO₂ WaermeInd	CO ₂ -Emissionen der Wärmeerzeugung in der Industrie
CO₂-Äq.	CO ₂ -Äquivalente bzw. Kohlenstoffdioxidäquivalente
CRF	Common Reporting Format, gemeinsames Berichtsformat für THG-Inventare
EC	European Commission
EE	Erneuerbare Energien
EEA	Europäische Umweltagentur
EEV	Endenergieverbrauch
EEV_{fossil}	Fossiler Endenergieverbrauch

EEV_{fossilWaermeInd}	Fossiler Endenergieverbrauch an Wärme der Industrie
EEV_{LKW}	Endenergieverbrauch des LKW-Verkehrs
EEV_{MIV}	Endenergieverbrauche des motorisierten Individualverkehrs
EEV_{nicht-erneuerbar}	Nicht-erneuerbarer Endenergieverbrauch
EEV_{WaermeInd}	Endenergieverbrauch an Wärme der Industrie
EF	Emissionsfaktor
EU	Europäische Union
Fläche	Wohnfläche
FW_{Erz}	Fernwärmeerzeugung
FW_{Ver}	Fernwärmeverbrauch
GHD	Gewerbe, Handel, Dienstleistung
GWh	Gigawattstunde
ifeu	Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH
kWh	Kilowattstunde
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LKW	Lastkraftwagen
MIV	motorisierter Individualverkehr (PKW, Krafträder)
Mt	Megatonnen
N₂O	Distickstoffoxid
PEV	Primärenergieverbrauch
PEV_{fossil}	Fossiler Primärenergieverbrauch
PKM	Personenkilometer, d.h. die durchschnittliche zurückgelegte Strecke pro Person und Jahr
PKM_{ges}	Gesamte Personenkilometer über alle Verkehrsträger inkl. nicht-motorisierter Verkehr
PKM_{MIV}	Personenkilometer im motorisierten Individualverkehr
PKM_{Motor}	Personenkilometer im motorisierten Verkehr
StBA	Statistisches Bundesamt
THG	Treibhausgase
TKM	Tonnenkilometer
TKM_{ges}	Gesamte Tonnenkilometer über alle Verkehrsträger
TKM_{LKW}	Transportleistung der LKW
UBA	Umweltbundesamt
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change (Klimarahmenkonvention)
ZSE	Zentrales System Emissionen

1 Zielsetzung und Aufbau

Ziel des Arbeitspaketes 3 ist eine explizite Analyse des Beitrages erneuerbarer Energien zur Emissionsreduktion in Deutschland. Eine Herausforderung, der dabei begegnet werden muss ist, dass die positive Entwicklung erneuerbarer Energien in einigen Bereichen (z.B. bei der Stromerzeugung) nicht direkt in den Emissionsentwicklungen im deutschen Treibhausgasinventar reflektiert wird. Gründe dafür sind beispielsweise parallel stattfindende Entwicklungen, die gleichzeitig emissionssteigernd (z.B. Atomausstieg) als auch senkend (Zubau erneuerbarer Stromerzeugungskapazität) wirken können. In Summe können deshalb die Emissionen stagnieren oder zeitweilig sogar steigen, obwohl der Anteil erneuerbarer Energien deutlich wächst und Emissionen vermeidet, die bei einer Nutzung anderer Technologien entstehen würden.

Darüber hinaus müssen zunächst geeignete Methoden angewendet werden, um den Beitrag der erneuerbaren Energien zur Emissionsentwicklung in Emissionseinheiten (z.B. Mt CO₂-Äq.) messbar zu machen und in einem Gesamtkontext der Emissionsentwicklung abzubilden.

Im Rahmen der Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger (UBA 2017a) erfolgt bereits eine Berechnung vermiedener Emissionen durch den Ausbau erneuerbarer Energien; aufgeteilt nach den Sektoren Strom, Wärme und Verkehr. Dabei werden die jeweiligen Energieträger in Anlehnung an die methodischen Grundsätze der Lebenszyklusanalyse, u.a. durch den Einbezug internationaler Vorkettenemissionen, bilanziert. Somit ist die Bilanzierung nicht deckungsgleich mit dem Betrachtungsraum des Treibhausgasinventars und erlaubt keinen Blick auf die gesamte Emissionsentwicklung in Deutschland. (siehe dazu Zwischenbericht zu Arbeitspaket 1 (Öko-Institut e.V. & ifeu 2017)).

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wird daher eine Methode entwickelt, die direkt auf die Anwendung in der Logik des Treibhausgasinventars abzielt, sprich sich auf die Entwicklung der direkten Emissionen nach Quellprinzip bezieht und den emissionsmindernden Anteil der erneuerbaren Energien quantifizierbar macht.

Dieser Bericht ist für diesen Zweck wie folgt gegliedert:

Im Kapitel 2 wird die generelle Methode der Komponentenzerlegung beschrieben, sowie die Auswahl der zur Anwendung gebrachten spezifischen Methode begründet. In diesem Kapitel wird auch die Festlegung des Betrachtungsraumes konkretisiert und alle zur Anwendung gebrachten Datenquellen werden aufgelistet.

Das Kapitel 3 widmet sich, gliedert nach Sektoren, der Dokumentation der spezifischen Analytik je Sektor, sowie der anschaulichen Ergebnisdokumentation und -interpretation.

2 Methodischer Ansatz

2.1 Einführung in die Komponentenzerlegung

Eine Komponentenzerlegung (oder Dekompositionsanalyse) kann verwendet werden, um den Beitrag wichtiger Treiber auf die zeitliche Entwicklung einer Variablen von Interesse (z.B. energiebedingte Treibhausgasemissionen) zu quantifizieren. 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.

Eine Komponentenzerlegung beginnt damit, eine Leitfunktion zu definieren, die die interessierende Variable zu ihren Treibern in Beziehung setzt (Ang 2004). Es gibt verschiedene Methoden der Komponentenzerlegung. Eines der wichtigsten Unterscheidungsmerkmale ist, ob die Methode eine vollständige Zerlegung ermöglicht oder auch ein Residuum produziert.

Nehmen wir an, dass die interessierende Variable die energiebedingten CO₂-Emissionen sind.

Die Laspeyres-Methode misst den Beitrag eines Treibers (z.B. der erneuerbaren Energien) zur Gesamtveränderung der Variable von einem Ausgangsjahr auf das Betrachtungsjahr unter der Annahme, dass alle anderen Treiber ihren Wert des Ausgangsjahres behalten. Jeder Treiber, der bei der Definition der energiebedingten CO₂-Emissionen eine Rolle spielt, wird jeweils individuell auf das Betrachtungsjahr geändert, während alle anderen Werte auf dem Wert des Ausgangsjahres gehalten werden. Siehe zum Beispiel (Ang 2000). Dieses Vorgehen wird auch prospektiv genannt (Albrecht et al. 2002).

Im Gegensatz dazu wird bei der Anwendung der **Paasche-Methode** der Beitrag eines Treibers an der Gesamtänderung ermittelt, in dem alle anderen Treiber auf das Betrachtungsjahr verändert werden und nur der zu betrachtende Treiber auf dem Wert des Ausgangsjahres gehalten wird. Dies wird sukzessive für alle Treiber durchgeführt. Diese Methode wird auch als retrospektiv bezeichnet (Sun 1998).

Beide Ansätze erklären die isolierten Effekte aller in der Leitfunktion definierten Treiber. Als solche produzieren sie ein Residuum – eine Menge, die nicht auf diese isolierten Effekte der einzelnen Treiber zurückzuführen ist. Dieser Rest ist die Differenz zwischen der beobachteten Gesamtänderung (z. B. Änderung der energiebedingten CO₂-Emissionen zwischen Ausgangs- und Betrachtungsjahr) und dem Wert, der sich durch Summierung der berechneten Beiträge der jeweiligen Treiber ergibt. Das Residuum ist ein Ausdruck gemischter Effekte, d. h. von Änderungen in der zu erklärenden Variable, die durch das gemeinsame Wirken von Treibern ausgelöst werden. Die Komponentenzerlegung ist somit nicht vollständig und der Modellierer muss entscheiden, wie mit dem Residuum fortgefahren werden soll. Zu den Möglichkeiten gehört die Vernachlässigung (wenn der Wert hinreichend klein ist), ihn explizit auszuweisen, oder mit geeigneten Methoden auf die isolierten Effekte der einzelnen Treiber zu verteilen (Seibel 2003). Insbesondere vor dem Hintergrund der Zielgruppe, an die sich die Kommunikation der Ergebnisse richtet, ist dies eine wichtige Entscheidung.

Neben den oben genannten Methoden gibt mehrere Methoden, die den Vorteil einer vollständigen Komponentenzerlegung ohne Residuum bieten, beispielsweise den **Log-Mean-Divisia-Index-Methode (LMDI)** wie in (Ang 2005) beschrieben, sowie die **Shapley-Methode** (beschrieben z.B. in Albrecht et al. 2002). Diese Methoden verteilen das möglicherweise auftretende Residuum der gemischten Effekte endogen und bieten daher den Vorteil einer vollständigen Komponentenzerlegung in einem Schritt.

Insbesondere die LMDI-Methode wird in der Literatur als besonders geeignet für Untersuchungen im Themengebiet Energie empfohlen:

(Ang 2004) bewertet die verschiedenen Optionen der Komponentenzerlegung nach ihrer theoretischen Basis, der Anpassbarkeit an verschiedene Fragestellungen, der Nutzerfreundlichkeit und der Komplexität der Interpretation der Ergebnisse. Methoden, die diesen Kriterien genügen, erzeugen keine oder sehr kleine Restterme (Residuen) und können auch stark schwankende, negative oder (Nah-)Null-Werte als Input vertragen. Sowohl der additive als auch der multiplikative Log Mean Divisia Index (LMDI 1) erfüllen alle Anforderungen und werden von ihm für die meisten Anwendungen im Themenbereich Energie empfohlen.

Die generelle Formulierung des additiven LMDI Ansatzes sieht wie folgt aus; veranschaulicht am Beispiel der THG-Emissionen (THG) und der Annahme von vier treibenden Faktoren (X1-X4):

$$\begin{aligned} \Delta THG &= \frac{THG_t - THG_0}{\ln THG_t - \ln THG_0} \ln \left(\frac{X_{it}}{X_{i0}} \right) \\ &= \frac{THG_t - THG_0}{\ln THG_t - \ln THG_0} \ln \left(\frac{X_{1t}}{X_{10}} \right) + \frac{THG_t - THG_0}{\ln THG_t - \ln THG_0} \ln \left(\frac{X_{2t}}{X_{20}} \right) + \frac{THG_t - THG_0}{\ln THG_t - \ln THG_0} \ln \left(\frac{X_{3t}}{X_{30}} \right) + \frac{THG_t - THG_0}{\ln THG_t - \ln THG_0} \ln \left(\frac{X_{4t}}{X_{40}} \right) \end{aligned}$$

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).

Vor dem Hintergrund der Relevanz dieser Methode, ihrer Vorteile, sowie einer möglichen Vergleichbarkeit mit anderen Studien, wird sie im Rahmen des Arbeitspaketes für alle betrachteten Sektoren zur Anwendung gebracht. Im Sektor Strom erfolgt auf Grund der Besonderheiten dieses Sektors eine Erweiterung der Methode. Diese ist im Abschnitt 3.3 dokumentiert.

2.2 Festlegung des Betrachtungsraums

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

Zeitlich berücksichtigt werden die Jahre 1990 bis 2015 (bzw. 2014 im Sektor Strom). Abgedeckt wird damit der komplette für die Öffentlichkeit relevante Zeitraum der Emissionsberichterstattung¹. Die Komponentenzerlegung erfolgt in zweifacher Art und Weise

1. gegenüber 1990, um die kumulierten Beiträge der Treiber zur Emissionsveränderung seit 1990 kenntlich zu machen, sowie
2. von Jahr auf Jahr, um die Treiber der Veränderungen der Emissionen von einem auf das andere Jahr erkenntlich zu machen.

Auf Grund der Datenlage musste in Ausnahmefällen für die Analyse ein anderer Zeitraum als 1990 bis 2015 gewählt werden. Dies wird in den jeweiligen Sektorkapiteln dargestellt.

Emissionsseitig werden die direkten Emissionen gemäß der Berichterstattung im deutschen Treibhausgasinventar (UBA 2017b) berücksichtigt. Das bedeutet, dass die Emissionen gemäß Quellprinzip dort berücksichtigt werden, wo sie entstehen oder wo sie zugeordnet sind. Es werden nur die direkten Emissionen berücksichtigt. Emissionen durch Aktivitäten in der Vorkette bleiben in der Betrachtung der jeweiligen Quelle unberücksichtigt, können aber selbst als Quelle ausgewiesen sein, soweit sie dem Territorialprinzip genügen.²

Sektoral wird bei der Analyse ein möglichst großer Anteil der Emissionen, die im Treibhausgasinventar berichtet werden, abgedeckt. Während eines Fachgesprächs im März 2017 wurden dabei gemeinsam mit Expert/-innen Vereinbarungen getroffen und anschließend mit dem UBA folgende Sektoren abgestimmt:

- ▶ Gesamte THG-Emissionen (ohne die Deutschland zurechenbaren Emissionen aus internationalem Luft- und Seeverkehr, ohne LULUCF);
- ▶ Energiebedingte CO₂-Emissionen (CRF 1);
- ▶ CO₂-Emissionen der Stromerzeugung (Verwendungsart Stromerzeugung in CRF 1.A.1 und 1.A.2);
- ▶ CO₂-Emissionen der Industriewärme (Verwendungsart Wärmeerzeugung in CRF 1.A.1.b, 1.A.1.c und 1.A.2);
- ▶ CO₂-Emissionen der Raumwärme (CRF 1.A.4.b);
- ▶ CO₂-Emissionen der Fernwärme (Verwendungsart Wärmeerzeugung in CRF 1.A.1.a);
- ▶ CO₂-Emissionen des Personenstraßenverkehrs (CRF 1.A.3.b.i und 1.A.3.b.iv);
- ▶ CO₂-Emissionen des schweren Straßengüterverkehrs (Teilmenge von CRF 1.A.3.b.iii).

¹ 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 einschließt, 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.

² Der Zwischenbericht zu Arbeitspaket 1 (Öko-Institut e.V. und ifeu 2017) enthält eine detaillierte Analyse zum Quellprinzip, Berücksichtigung der Vorketten und anderen Aspekten des Betrachtungsraums.

Insgesamt werden die oben genannten acht Komponentenzerlegungen durchgeführt. Die sechs sektoralen Komponentenzerlegungen (farblich hervorgehoben in Abbildung 1) decken aktuell ca. 90 % der energiebedingten CO₂-Emissionen ab. Die energiebedingten CO₂-Emissionen machen rund 80 % der gesamten THG-Emissionen aus. Die Abbildung 1 veranschaulicht die Anteile der jeweiligen Sektoren.

Abbildung 1: Skizze des Betrachtungsraumes entsprechend der aktuellen Emissionsanteile



Quelle: Eigene Darstellung

2.3 Datenquellen

Die folgenden Datenquellen bilden die Grundlage der hier vorliegenden Analyse. Diese Quellen sind öffentlich zugänglich und werden regelmäßig aktualisiert, so dass auch die Komponentenzerlegung regelmäßig an die neuesten Entwicklungen angepasst werden kann. Die Datensätze für die Faktoren der analysierten Sektoren wurden möglichst harmonisiert. Z.B. taucht die Bevölkerung in 3 von 8 Komponentenzerlegungen in der Leitfunktion auf. Um Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu garantieren, stammt der Datensatz jeweils aus der gleichen Quelle.

Tabelle 1: Datenquellen für die Komponentenzerlegung

Sektor	Datensatz	Datenquelle
Makro (THG-Emissionen)	Bevölkerung	StBA (2017)
	Bruttoinlandsprodukt	AGEB (2016b)
	Primärenergieverbrauch (ohne nicht-energetischer Verbrauch, ohne intern. Flugverkehr)	AGEB (2016b), UBA (2016b)
	Endenergieverbrauch (ohne intern. Flugverkehr)	AGEB (2016b), UBA (2016b)
	Gesamte Treibhausgasemissionen (ohne intern. Flugverkehr; ohne LULUCF)	UBA (2016b)
Makro (energiebedingtes CO ₂)	Bevölkerung	StBA (2017)
	Bruttoinlandsprodukt	AGEB (2016b)
	Endenergieverbrauch (ohne intern. Flugverkehr)	AGEB (2016b), UBA (2016b)
	Endenergieverbrauch nicht erneuerbar (ohne intern. Flugverkehr)	AGEB (2016b), UBA (2016b)
	Energiebedingte CO ₂ -Emissionen (CRF 1)	UBA (2016b)
CO ₂ -Emissionen der Stromerzeugung	Endenergieverbrauch Strom	AGEB (2016c)
	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)
Stromausgleichssaldo mit dem Ausland (Importe positiv)	AGEB (2017)	
CO ₂ -Emissionen der Industriewärme	Bruttoinlandsprodukt	AGEB (2016b)
	Bruttoproduktionswert der Industrie	AGEB (2016b)
	Endenergieverbrauch ohne Strom	AGEB (2016b), UBA (2016b)
	Fossiler Endenergieverbrauch	UBA (2016b)
	CO ₂ -Emissionen der Industrie aus fossilen Brennstoffen	UBA (2016b)

Sektor	Datensatz	Datenquelle
CO ₂ -Emissionen der Raumwärme	Bevölkerung	StBA (2017)
	Wohnfläche	AGEB (2016b)
	Endenergieverbrauch der privaten Haushalte ohne Strom	AGEB (2016b)
	Fossiler Endenergieverbrauch der privaten Haushalte ohne Strom	AGEB (2016b)
	CO ₂ -Emissionen der privaten Haushalte	UBA (2016b)
CO ₂ -Emissionen der Fernwärme	Fernwärmeerzeugung	AGEB (2016c)
	Leistungsverluste Fernwärme	AGEB (2016c)
	Fossiler Primärenergieeinsatz zur Fernwärmeerzeugung	UBA (2016b)
	Biogener Primärenergieeinsatz zur Fernwärmeerzeugung	UBA (2016b)
	Primärenergieeinsatz sonstiger erneuerbarer Energieträger zur Fernwärmeerzeugung	AGEB (2016c)
	Nuklearer Primärenergieeinsatz zur Fernwärmeerzeugung	AGEB (2016c)
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 (2016b)
	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

3 Sektorbetrachtung

3.1 Die Makroebene: gesamte Treibhausgasemissionen

3.1.1 Identifikation der Treiber

Die Dekomposition auf „Makroebene“ dient dazu, die Beiträge wesentlicher Treiber an der Veränderung der gesamten deutschen Treibhausgasemissionen (ohne die Deutschland zurechenbaren Emissionen aus internationalem Luft- und Seeverkehr, ohne LULUCF; kurz THG-Emissionen) zu quantifizieren (in Mt CO₂-Äq.).

Die THG-Emissionen betragen im Jahr 1990 rund 1 250 Mt CO₂-Äq. und sanken bis in 2015 auf gut 900 Mt CO₂-Äq.

Um die oben genannte Quantifizierung zu ermöglichen, werden die wesentlichen Treiber identifiziert, die eine Veränderung der THG-Emissionen über die Zeit verursachen, und in Zusammenhang miteinander gesetzt.

Auf Makroebene lehnt sich die gewählte Formel, die den Zusammenhang der Treiber beschreibt, an die Kaya-Identität an (siehe z.B. (IPCC 2000)):

$$THG = Bev \cdot \frac{BIP}{Bev} \cdot \frac{EEV}{BIP} \cdot \frac{PEV}{EEV} \cdot \frac{THG}{PEV}$$

Die Emissionstreiber sind dabei die Folgenden:

Die Bevölkerung (*Bev*) beeinflusst die THG-Emissionen, da sie emissionsverursachende Tätigkeiten ausübt, z. B. Heizen des Wohnraumes mit emissionsverursachenden Energieträgern wie Heizöl und Erdgas und Verbrauch konventioneller Kraftstoffe für Fortbewegung mit einem PKW. Je höher die Bevölkerungszahl, desto mehr Personen üben solche Tätigkeiten aus.

Der Wirtschaftsentwicklung ($\frac{BIP}{Bev}$), gemessen als Bruttoinlandsprodukt (*BIP*) pro Person (*Bev*), bildet ab, wie eine Wohlstandsänderung zur Veränderung von THG-emissionen beiträgt, z.B. durch die verstärkte Nachfrage von Gütern bei steigendem Wohlstand.

Die Energieintensität ($\frac{EEV}{BIP}$), gemessen als eingesetzte Endenergie (*EEV*) je Einheit *BIP*, vermittelt, wie stark energiegetrieben die Struktur der Volkswirtschaft ist, d.h. wieviel Energie für die Erwirtschaftung einer Einheit *BIP* benötigt wird. Dies kann sich im Zeitablauf und bei einer Umstrukturierung der Wirtschaft, z. B. durch das Wachsen des Dienstleistungssektors oder der Reduktion von energieintensiven Produktionsprozessen, verändern und beeinflusst damit die Höhe der verursachten THG-Emissionen.

Die Umwandlungsverluste ($\frac{PEV}{EEV}$), gemessen als benötigte Primärenergie (*PEV*) je Einheit erzeugter Endenergie (*EEV*), stellt dar, wieviel Primärenergie zur Erzeugung einer Einheit Endenergie benötigt wird. Der Einsatz von fossilen Primärenergieträgern ist in der Regel mit höheren Umwandlungsverlusten verbunden als der Einsatz von erneuerbaren Energieträgern. Eine Veränderung dieses Anteils über die Zeit beeinflusst daher auch die Höhe der gesamten THG-Emissionen.

Der Brennstoffwechsel ($\frac{THG}{PEV}$) trifft Aussagen über die Emissionsintensität des Primärenergiemixes. Ein hoher Anteil insbesondere von Kohle und Ölderivaten führt zu hohen Emissionen pro verbrauchte Energieeinheit. Ein hoher Anteil von erneuerbaren Energien senkt die Emissionsintensität.

Eine explizite Darstellung eines Treibers *Anteil erneuerbarer Energien* kann bei der Berücksichtigung der gesamten Treibhausgase aus methodischen Gründen hier nicht erfolgen. Eine Änderung des Anteils von erneuerbaren Energien wird in den Treibern Umwandlungsverluste und Brennstoffwechsel erfasst.

Der Analysezeitraum der Dekompositionsanalyse auf Makroebene ist 1990–2015. Die Analyse der Veränderung der THG-Emissionen erfolgt dabei sowohl

- ▶ gegenüber dem Jahr 1990
- ▶ als auch von Jahr auf Jahr

Die Jahr-auf-Jahr-Analyse stellt dar, welchen Anteil die Treiber zur Veränderung der Emissionen von einem Jahr auf das andere beitrugen (z.B. von 1990 auf 1991).

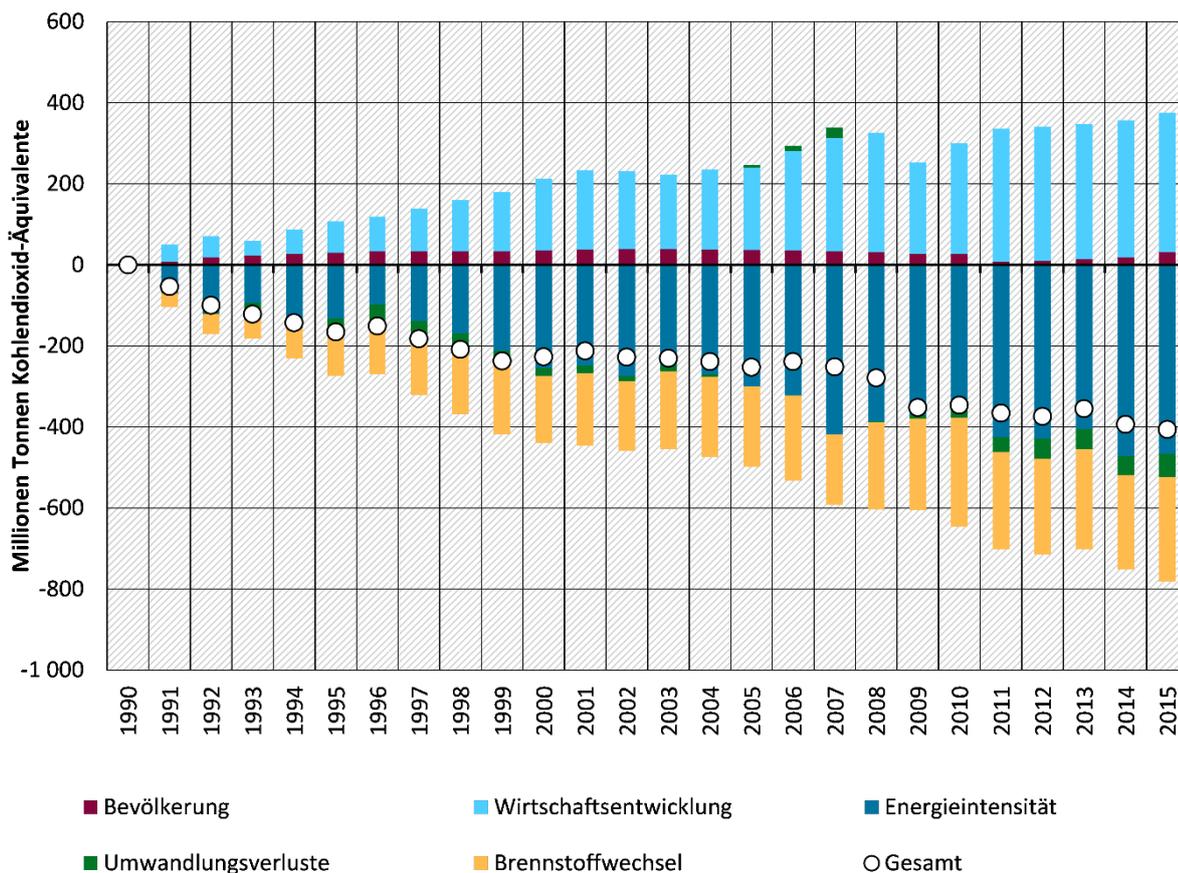
Die Analyse gegenüber dem Ausgangsjahr 1990 ermittelt die kumulierten Beiträge der Treiber zu den Emissionsänderungen von 1990 bis zum Vergleichsjahr (also z.B. von 2015 gegenüber 1990).

3.1.2 Ergebnisse

3.1.2.1 Analyse gegenüber 1990

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

Abbildung 2: Komponentenzerlegung der Entwicklung der THG-Emissionen seit 1990



Quelle: Eigene Berechnung

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 Brennstoffwechsel (orangenes Segment). Der emissionsmindernde Beitrag dieser

Treiber gleicht den emissionstreibenden Effekt der anderen Treiber mehr als aus. Der stärkste Treiber der gesamten THG-Emissionen ist durchgängig die Wirtschaftsentwicklung (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.

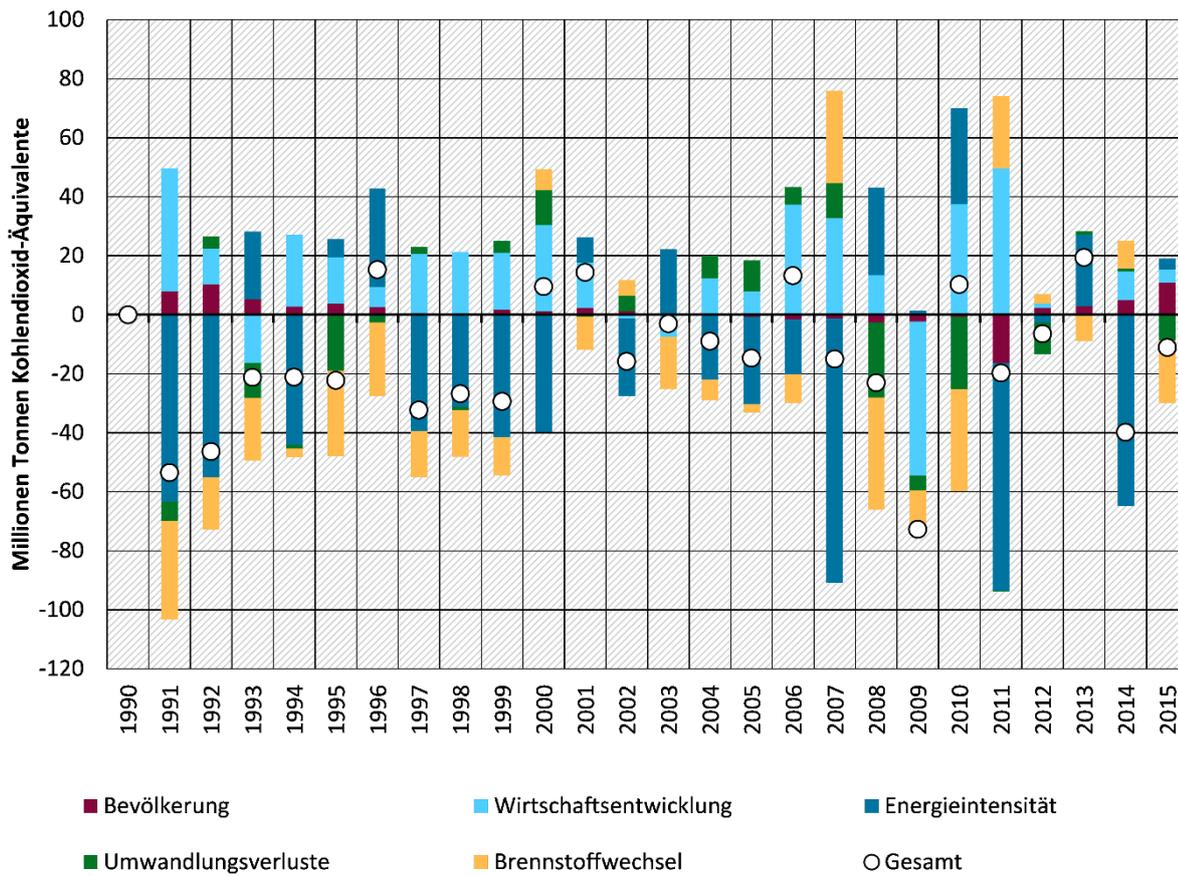
3.1.2.2 Jahr-auf-Jahr Analyse

Die folgende Abbildung zeigt die Anteile, die die Emissionstreiber Bevölkerung, Wirtschaftsentwicklung, Energieintensität, Umwandlungsverluste und Brennstoffwechsel zur Veränderung der gesamten deutschen THG-Emissionen jeweils gegenüber dem Vorjahr beitragen. Der Effekt jedes Jahres bezieht sich immer auf die Veränderung der THG-Emissionen gegenüber dem Vorjahr und kann daher zur Erkennung außergewöhnlicher Ereignisse dienen, die in der Betrachtung gegenüber dem Ausgangsjahr 1990 nicht sichtbar werden. Im Folgenden werden einige markante Punkte anhand historischer Ereignisse plausibilisiert.

Ungewöhnlich hoch ist der Rückgang der THG-Emissionen in **1991 und 1992** mit jeweils etwa 4 % gegenüber dem Vorjahr. Dieser Rückgang erklärt sich laut Analyse zum großen Teil durch den starken Rückgang der Energieintensität. Historisch fiel in diesen Zeitpunkt der abrupte Einbruch der DDR-Industrie. Nur in **2009** – zum Zeitpunkt der globalen wirtschaftlichen Krise – erfolgte ein noch höherer Emissionsrückgang (um knapp 7 % gegenüber dem Vorjahr), an dieser Stelle gekennzeichnet durch den deutlichen Einbruch des Treibers Wirtschaftsentwicklung. Als sich die Wirtschaft wieder erholte, stiegen auch die Emissionen gegenüber dem Vorjahr (um etwa 4 %) wieder.

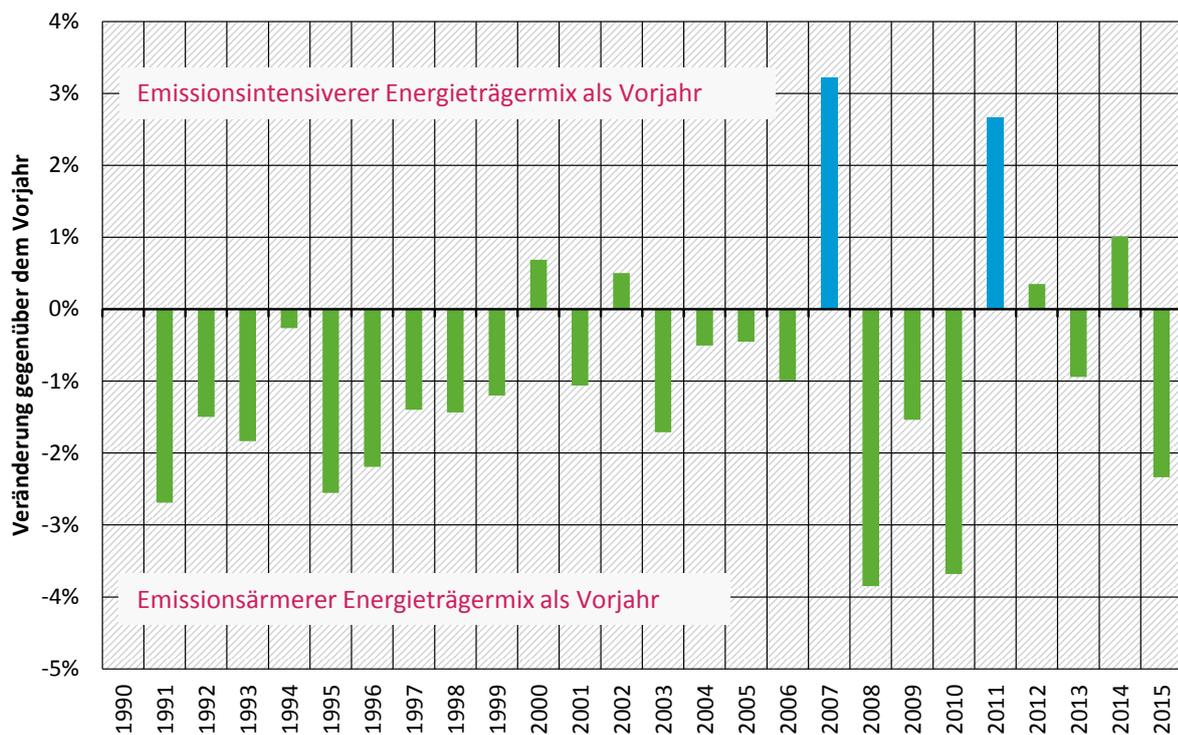
Besonders auffällig sind in den **Jahren 2007 und 2011** die besonders stark emissionssteigernd wirkenden Beiträge des Treibers Brennstoffwechsel, der sonst zum größten Teil emissionsmindernd wirkt. In diesen beiden Jahren sank der Einsatz der Kernkraft zur Erzeugung von Strom (siehe dazu Abschnitt 3.3.2). Um den Strombedarf dennoch zu decken kamen in diesen Jahren gegenüber dem Vorjahr jeweils fossile Kraftwerke zum Einsatz, die daher den Energieträgermix schmutziger und damit emissionstreibender machten als im jeweiligen Vorjahr, da erneuerbare Energien nicht in entsprechender Größenordnung Ersatz schaffen konnten (vgl. Abbildung 4).

Abbildung 3: Komponentenzerlegung der jährlichen Entwicklung der THG-Emissionen



Quelle: Eigene Berechnung

Abbildung 4: Veränderung des Energieträgermix gegenüber dem Vorjahr



Quelle: Eigene Berechnung

3.2 Makroebene: Energiebedingte CO₂-Emissionen

Die Dekomposition auf „Makroebene“ dient dazu, die Beiträge wesentlicher Treiber an der Veränderung der Emissionen des Sektor CRF 1 (im Folgenden: energiebedingte CO₂-Emissionen) zu quantifizieren (in Mt CO₂).

Die CO₂-Emissionen betragen im Jahr 1990 insgesamt 990 Mt CO₂-Äq. und sanken bis in 2015 auf 744 Mt CO₂-Äq.

Um die Quantifizierung zu ermöglichen, werden die wesentlichen Treiber identifiziert, die eine Veränderung der energiebedingten CO₂-Emissionen über die Zeit verursachen und in Zusammenhang miteinander gesetzt.

Die Treiber der energiebedingten CO₂-Emissionen werden dabei wie folgt definiert:

$$CO_{2\text{ energie}} = Bev \cdot \frac{BIP}{Bev} \cdot \frac{EEV}{BIP} \cdot \frac{EEV_{\text{nicht-erneuerbar}}}{EEV} \cdot \frac{CO_{2\text{ Energie}}}{EEV_{\text{nicht-erneuerbar}}}$$

Die Bevölkerung (*Bev*) beeinflusst energiebedingte CO₂-Emissionen, da sie emissionsverursachende Tätigkeiten ausübt, z.B. Heizen des Wohnraumes (CRF 1A4b) mit emissionsverursachenden Energieträgern wie Heizöl und Erdgas und Verbrauch konventioneller Kraftstoffe für Fortbewegung mit einem PKW (Teil von CRF 1A3b). Je höher die Bevölkerung desto mehr Personen üben solche Tätigkeiten aus.

Die Wirtschaftsentwicklung ($\frac{BIP}{Bev}$), gemessen als Bruttoinlandsprodukt (*BIP*) pro Person (*Bev*), bildet ab, wie eine Wohlstandsveränderung zur Veränderung von energiebedingten Emissionen beiträgt, z.B. durch die verstärkte Nachfrage von Gütern bei steigendem Wohlstand. Diese Güter müssen hergestellt werden und verursachen dabei auch CO₂-Emissionen (CRF 1A2).

Die Energieintensität ($\frac{EEV}{BIP}$), gemessen als eingesetzte Endenergie (*EEV*) je Einheit *BIP* vermittelt, wie stark energiegetrieben die Struktur der Volkswirtschaft ist, d.h. wieviel Energie für die Erwirtschaftung einer Einheit *BIP* benötigt wird. Dies kann sich im Zeitablauf und bei einer Umstrukturierung der Wirtschaft, z.B. hin zu mehr Dienstleistungen oder weniger energieintensiven Produkten verändern und beeinflusst damit die Höhe der verursachten CO₂-Emissionen.

Der Einfluss erneuerbarer Energien ($\frac{EEV_{\text{nicht-erneuerbar}}}{EEV}$) wird an dieser Stelle als Anteil nicht erneuerbarer Endenergieverbrauch ($EEV_{\text{nicht-erneuerbar}}$) am gesamten Endenergieverbrauch (*EEV*) ausgedrückt. Nimmt der Anteil erneuerbarer Energien zu, so wird der treibende Effekt der nicht erneuerbaren Energien immer geringer.

Der Brennstoffwechsel und Atomausstieg ($\frac{CO_{2\text{ energie}}}{EEV_{\text{nicht-erneuerbar}}}$): trifft Aussagen über die Zusammensetzung des nicht-erneuerbaren Endenergieverbrauchs: Ein hoher Anteil insbesondere von Kohle und Ölderivaten führt zu hohen Emissionen pro verbrauchte Energieeinheit. Ein hoher Anteil von Erdgas senkt die Emissionsintensität.

Der Analysezeitraum der Dekompositionsanalyse auf Makroebene ist 1990-2015. Die Analyse der Veränderung der CO₂-Emissionen erfolgt dabei sowohl

- ▶ gegenüber dem Jahr 1990
- ▶ als auch von Jahr-auf-Jahr

Die Jahr-auf-Jahr-Analyse stellt dar, welchen Anteil die Treiber zur Veränderung der energiebedingten CO₂-Emissionen von einem Jahr auf das andere beitrugen (z.B. von 1990 auf 1991).

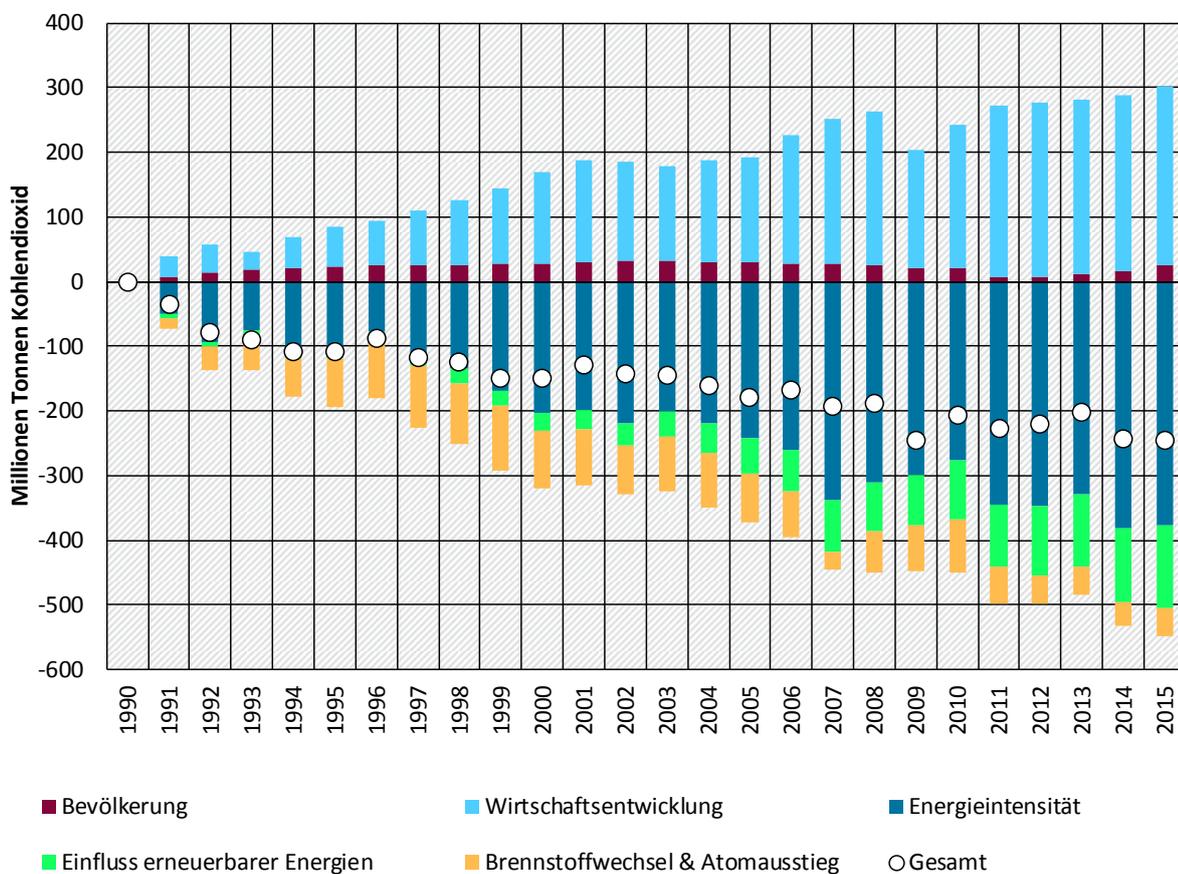
Die Analyse gegenüber dem Ausgangsjahr 1990 ermittelt die kumulierten Beiträge der Treiber zu den energiebedingten CO₂-Emissionsänderungen von 1990 bis zum Vergleichsjahr (also z.B. von 2015 gegenüber 1990).

3.2.1 Ergebnisse

3.2.1.1 Analyse gegenüber 1990

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

Abbildung 5: Komponentenzerlegung der energiebedingten CO₂-Emissionen seit 1990



Quelle: Eigene Berechnung

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 (orangeses Segment), sowie ein zunehmender Einfluss erneuerbarer Energien (hellgrünes Segment). Der emissionsmindernde Beitrag dieser Treiber gleicht den emissionstreibenden Effekt der anderen Treiber mehr als aus. Der stärkste Treiber der energiebedingten CO₂-Emissionen ist durchgängig die Wirtschaftsentwicklung (hellblau).

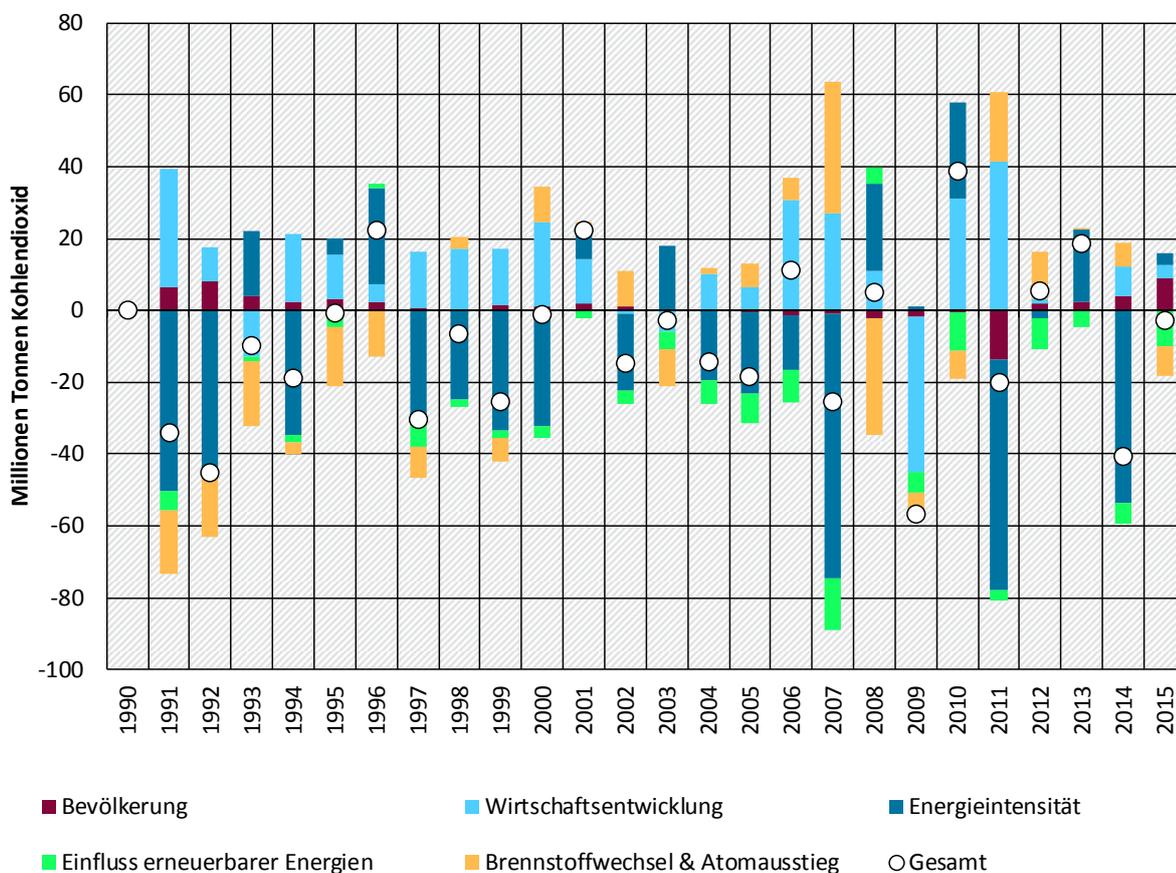
Sichtbar sind in dieser kumulierten Betrachtung eher Trends als jährliche Besonderheiten. Trotzdem wird aus dieser Betrachtung die Bedeutung der wirtschaftlichen Krise im Jahr 2009 deutlich: Der

emissionstreibende Effekt der Wirtschaftsentwicklung erfährt an dieser Stelle sogar in der kumulierten Betrachtung einen sichtbaren und plötzlichen Einbruch.

3.2.1.2 Jahr-auf-Jahr-Analyse

Die folgende Abbildung zeigt die Anteile, die die Emissionstreiber Bevölkerung, Wirtschaftsentwicklung, Energieintensität, Einfluss erneuerbarer Energien und Brennstoffwechsel & Atomausstieg zur Veränderung der deutschen energiebedingten CO₂-Emissionen jeweils gegenüber dem Vorjahr. Der Effekt jeden Jahres bezieht sich immer auf die Veränderung der energiebedingten CO₂-Emissionen gegenüber dem Vorjahr und kann daher zur Erkennung außergewöhnlicher Ereignisse dienen, die in der Betrachtung gegenüber dem Ausgangsjahr 1990 nicht sichtbar werden. Im Folgenden werden einige markante Punkte anhand historischer Ereignisse plausibilisiert.

Abbildung 6: Komponentenzerlegung der jährlichen Entwicklung der energiebedingten CO₂-Emissionen



Quelle: Eigene Berechnung

Ungewöhnlich hoch ist der Rückgang der energiebedingten Emissionen in 1991 und 1992 mit jeweils etwa 3 % und 5 % gegenüber dem Vorjahr. Dieser Rückgang erklärt sich laut Analyse zum großen Teil durch den starken Rückgang der Energieintensität. Historisch fiel in diesen Zeitpunkt der abrupte Einbruch der DDR Industrie. Nur in 2009 – zum Zeitpunkt der globalen wirtschaftlichen Krise – erfolgte ein noch höherer Rückgang der energiebedingten CO₂-Emissionen (um rund 7 % gegenüber dem Vorjahr), an dieser Stelle gekennzeichnet durch den deutlichen Einbruch des Treibers Wirtschaftsentwicklung. Als sich die Wirtschaft wieder erholte, stiegen auch die energiebedingten CO₂-Emissionen gegenüber dem Vorjahr wieder (um etwa 5 %, auf knapp 2 % unter dem Niveau von 2008).

Besonders auffällig sind in den Jahren 2007 und 2011 die besonders stark emissionssteigernd wirkenden Beiträge des Treibers Brennstoffwechsel & Atomausstieg, der sonst zum größten Teil emissionsmindernd wirkt (siehe dazu auch Abschnitt 3.3.2).

3.3 Strom

3.3.1 Identifikation der Treiber

Die meisten energiebedingten CO₂-Emissionen werden im Stromsektor emittiert. Auf die Stromerzeugung entfielen 366 Mt CO₂ im Jahr 1990, die bis zum Jahr 2015 auf 309 Mt CO₂ zurückgingen.³ Der Anteil der Emissionen aus der Stromerzeugung an den energiebedingten CO₂-Emissionen insgesamt ist dabei gestiegen: von 37% im Jahr 1990 auf 42% im Jahr 2015.

Die hier betrachteten Treiber werden im Folgenden dargestellt. Sie ergeben zusammen die CO₂-Emissionen im Stromsektor nach der folgenden Dekompositionsformel:

$$CO_{2Strom} = EEV \cdot \frac{BrStrV}{EEV} \cdot \frac{BrStrErz}{BrStrV} \cdot \frac{BrStrErz_{fossil}}{BrStrErz} \cdot \frac{BE_{fossil}}{BrStrErz_{fossil}} \cdot \frac{CO_{2Strom}}{BE_{fossil}}$$

Die einzelnen Faktoren in der Formel entsprechen den einzelnen Treibern.

Der **Stromverbrauch** (genauer der Endenergieverbrauch (**EEV**)) bildet die Nachfrage nach Strom ab, die natürlich der wesentliche Treiber für die Produktion ist.

Die **Verluste** ($\frac{BrStrV}{EEV}$) bei Herstellung, Speicherung und Transport von Strom (Kraftwerkseigenverbrauch, Pumpstromverluste, Netzverluste) sind eine vergleichsweise kleine Größe, müssen aber berücksichtigt werden, um sauber alle Schritte abzubilden, die zwischen Produktion und Endenergieverbrauch liegen.

Um die Differenz zwischen der inländischen Nachfrage und der Produktion exakt abzubilden, müssen auch die **Importe und Exporte** ($\frac{BrStrErz}{BrStrV}$) von Strom berücksichtigt werden. In die Dekompositionsanalyse geht der jährliche Import-Export-Saldo ein. Insbesondere in den letzten Jahren ist im jährlichen Saldo der Export von Strom stark gestiegen.

Der **Anteil erneuerbarer Energien** ist der zentrale Treiber, der hier untersucht werden soll. Er lässt sich über die Anteile der fossilen und der nuklearen Stromerzeugung berechnen, wobei der **Anteil der fossilen Stromerzeugung** ($\frac{BrStrErz_{fossil}}{BrStrErz}$) derjenige ist, der unmittelbar in den Ausdruck für die CO₂-Emissionen und damit in die Komponentenzerlegung eingeht. In einem ersten Schritt wird der Beitrag des fossilen Anteils zur Veränderung der CO₂-Emissionen quantifiziert.

In einem zweiten Schritt wird daraus der Beitrag des erneuerbaren und des nuklearen Anteils berechnet. Die Methode hierfür wird im Folgenden genauer dargestellt.

Die **Effizienz der fossilen Stromerzeugung** ($\frac{BE_{fossil}}{BrStrErz_{fossil}}$) ist ein weiterer wesentlicher Faktor für die CO₂-Emissionen. Um eine saubere Abgrenzung zum Wärmesektor vornehmen zu können, wird dabei für die fossile KWK-Stromerzeugung die Effizienz berechnet, indem die fossile Bruttostromerzeugung durch denjenigen fossilen Brennstoffeinsatz geteilt wird, der nach der Finnischen Methode der Stromscheibe zugeordnet wird.⁴

³ Für Emissionen aus KWK-Anlagen sind hier nur die Emissionen der Stromerzeugung und nicht der Wärmeerzeugung berücksichtigt. Die Inputdaten kommen aus dem ZSE, das die Aufteilung nach finnischer Methode vornimmt.

⁴ Die so dargestellte Effizienz ist daher nicht direkt mit den Angaben zu Wirkungs- oder Nutzungsgraden von KWK-Kraftwerken vergleichbar, die in Bezug auf den gesamten Brennstoffeinsatz (bzw. für den KWK-den Brennstoffeinsatz für Strom und Wärme in der KWK-Scheibe) angegeben werden.

Die **Emissionsintensität der fossilen Brennstoffe** ($\frac{CO_{2Strom}}{BE_{fossil}}$) bestimmt ebenfalls die CO_2 -Emissionen. Eine Veränderung dieses Treibers entspricht einer Veränderung im fossilen Strommix, wobei hier vor allem die Anteile von Braunkohle, Steinkohle und Erdgas relevant sind.

Der Betrachtungszeitraum beginnt im Jahr 1990. Emissionsdaten liegen zurzeit bis inklusive 2014 vor.

3.3.1.1 Disaggregation der nicht-fossilen Treiber

Bei der Dekompositionsanalyse im Stromsektor ist eine besondere Herausforderung, dass es im Strommix nicht nur den fossilen Anteil und den erneuerbaren Anteil gibt, sondern dass zum nicht-fossilen Anteil der Stromerzeugung, neben den erneuerbaren Energien auch die Kernenergie zählt. Da hier insbesondere die Wirkungen der erneuerbaren Energien interessieren, sind sie getrennt von der Kernenergie zu quantifizieren.

Hinzu kommt, dass sich die Anteile der erneuerbaren Energien und der Kernenergie beide im hier betrachteten Zeitraum verändern, und zwar tendenziell in gegenläufige Richtungen: Während Strom aus erneuerbaren Energien zunimmt, sinkt der Anteil der Kernenergie. Es kann deswegen auch vorkommen, dass die Effekte der steigenden erneuerbaren Energien und der abnehmenden Kernenergie sich in einzelnen Jahren gegenseitig weitgehend kompensieren, so dass sich der fossile Anteil selbst nur minimal ändert und daher auch keinen Effekt auf die Emissionen ausübt. Dennoch gibt es natürlich auch in solchen Jahren eine Wirkung von Kernenergie und erneuerbaren Energien auf die Emissionen, denn hätte es beispielsweise weniger erneuerbare Energien gegeben, wären die Emissionen höher ausgefallen.

Um die Wirkung von erneuerbaren Energien und Kernenergie im Einzelnen zu quantifizieren, wird daher wie folgt vorgegangen: Der Effekt der Veränderung eines einzelnen erneuerbaren Energieträgers bzw. der Kernenergie wird mit einer zweiten Dekompositionsmethode ermittelt. Bei der Kombination von Laspeyres- und Paasche-Ansatz sind auch additive Dekompositionsformeln möglich, während bei dem hier sonst gewählte LMDI-Ansatz multiplikative Zielfunktionen zugrunde gelegt werden müssen.

Die oben genannte Dekompositionsformel kann damit beispielsweise zu folgendem Ausdruck umformuliert werden:

$$CO_{2Strom} = EEV \cdot \frac{BrStrV}{EEV} \cdot \frac{BrStrErz}{BrStrV} \cdot \frac{BE_{fossil}}{BrStrErz_{fossil}} \cdot \frac{CO_{2Strom}}{BE_{fossil}} \cdot (1 - A_{Wind} - A_{Bio} - A_{PV} - A_{nukl})$$

mit A_i als Anteil der jeweiligen nicht-fossilen Technologie i im Strommix.

Bei der Dekomposition werden stets zwei Zeitpunkte (Betrachtungsjahr und Ausgangsjahr) miteinander verglichen. Die Vorstellung ist dabei, dass sich der betrachtete Parameter auf den Wert des anderen Jahres verändert, während alle anderen Parameter gleich bleiben. Dies kann sowohl aus Sicht des Ausgangsjahres (Laspeyres), als auch aus Sicht des Betrachtungsjahres (Paasche) durchgeführt werden. Soll keiner der beiden Standpunkte der Vorzug gegeben werden, kann man beide Methoden durch Bildung des Mittelwertes kombinieren.

Damit ergibt sich die Änderung der CO_2 -Emissionen zwischen Betrachtungsjahr und Ausgangsjahr aufgrund der Veränderung einer einzelnen Technologie, beispielsweise Windenergie, wie folgt:

$$\Delta CO_{2Strom}(A_{Wind}) = - \frac{(Z(t_{Szenario}) + Z(t_{Basis}))}{2} \cdot (A_{Wind}(t_{Szenario}) - A_{Wind}(t_{Basis}))$$

mit

$$Z(t) = EEV(t) \cdot \frac{BrStrV(t)}{EEV(t)} \cdot \frac{BrStrErz(t)}{BrStrV(t)} \cdot \frac{BE_{fossil}(t)}{BrStrErz_{fossil}(t)} \cdot \frac{CO_{2Strom}(t)}{BE_{fossil}(t)}$$

Mit diesem Ansatz werden für alle erneuerbaren Technologien und für die Kernenergie die Effekte auf die CO₂-Emissionen ausgerechnet. Sie entsprechen in Summe mit sehr guter Übereinstimmung⁵ dem Effekt, den die LMDI-Methode für den nicht-fossilen Anteil liefert, der damit entsprechend aufgeteilt werden kann.

3.3.2 Ergebnisse

3.3.2.1 Analyse gegenüber 1990

Abbildung 7 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 bewegen sich 2015 wieder in einer ähnlichen Höhe wie 1999.

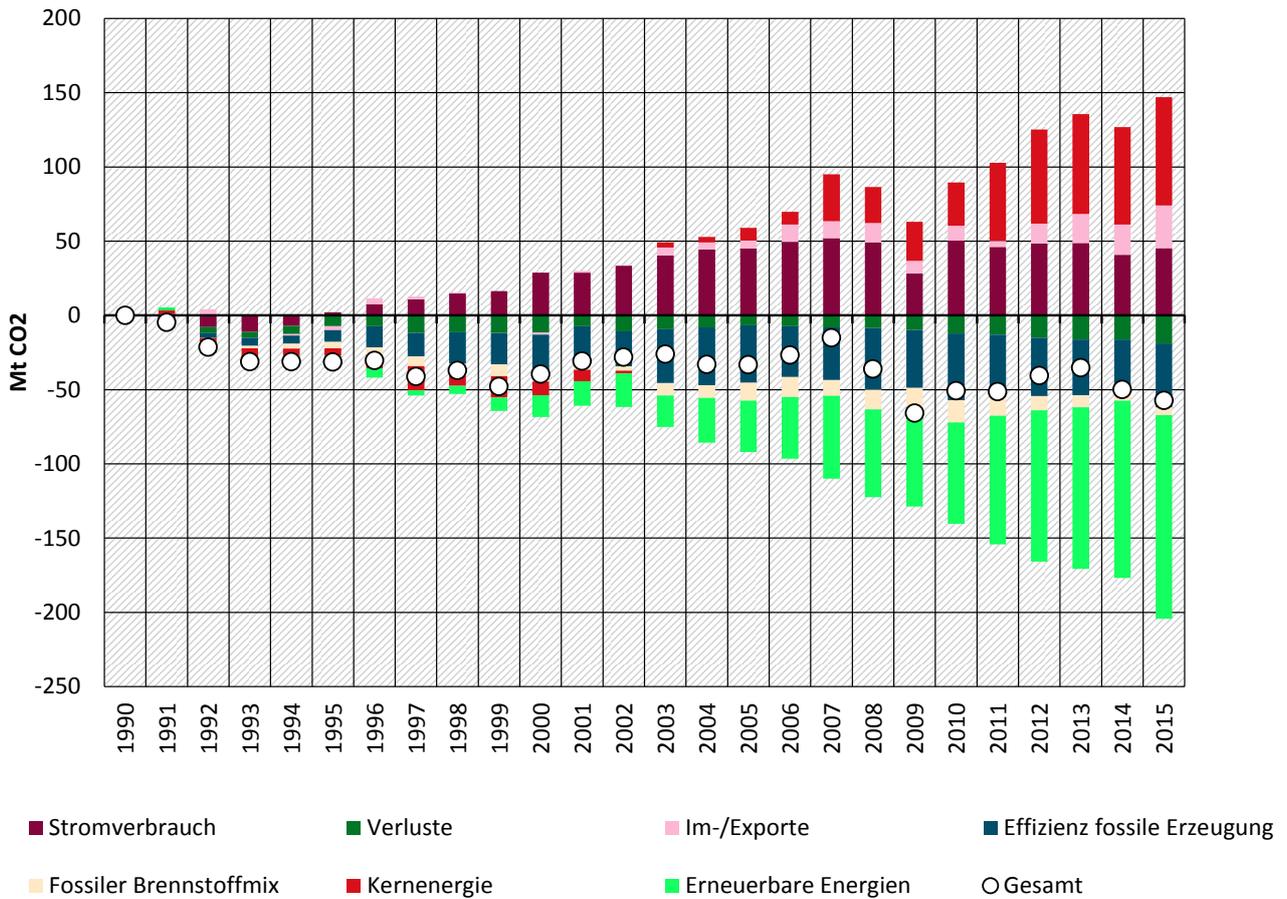
Die Ergebnisse der Dekompositionsanalyse zeigen, welche Treiber für diese Entwicklung eine Rolle gespielt haben. Unter den Treibern sind der **Endenergieverbrauch**, der Rückgang der **Kernenergie**, die **Effizienz** der fossilen Erzeugung und der Zubau der **erneuerbaren Energien** diejenigen mit den größten Effekten im Vergleich zu 1990. Dabei treiben die Entwicklung des Endenergieverbrauchs und der Kernenergie 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 Endenergienachfrage 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 auch ein Maß für das Verhältnis von Kohle und Erdgas bei der Stromerzeugung ist, hat ebenfalls nur einen kleinen emissionsmindernden und in den letzten Jahren sogar wieder rückläufigen Beitrag. Dagegen führt sich die Entwicklung des **Strom-austauschsaldo** 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.

⁵ Die maximale Abweichung im Betrachtungszeitraum zwischen beiden Methoden beträgt 0,04%.

Abbildung 7: Komponentenzerlegung der CO₂-Emissionen des Stroms seit 1990 (erneuerbare Energien zusammengefasst)



Quelle: Eigene Berechnung

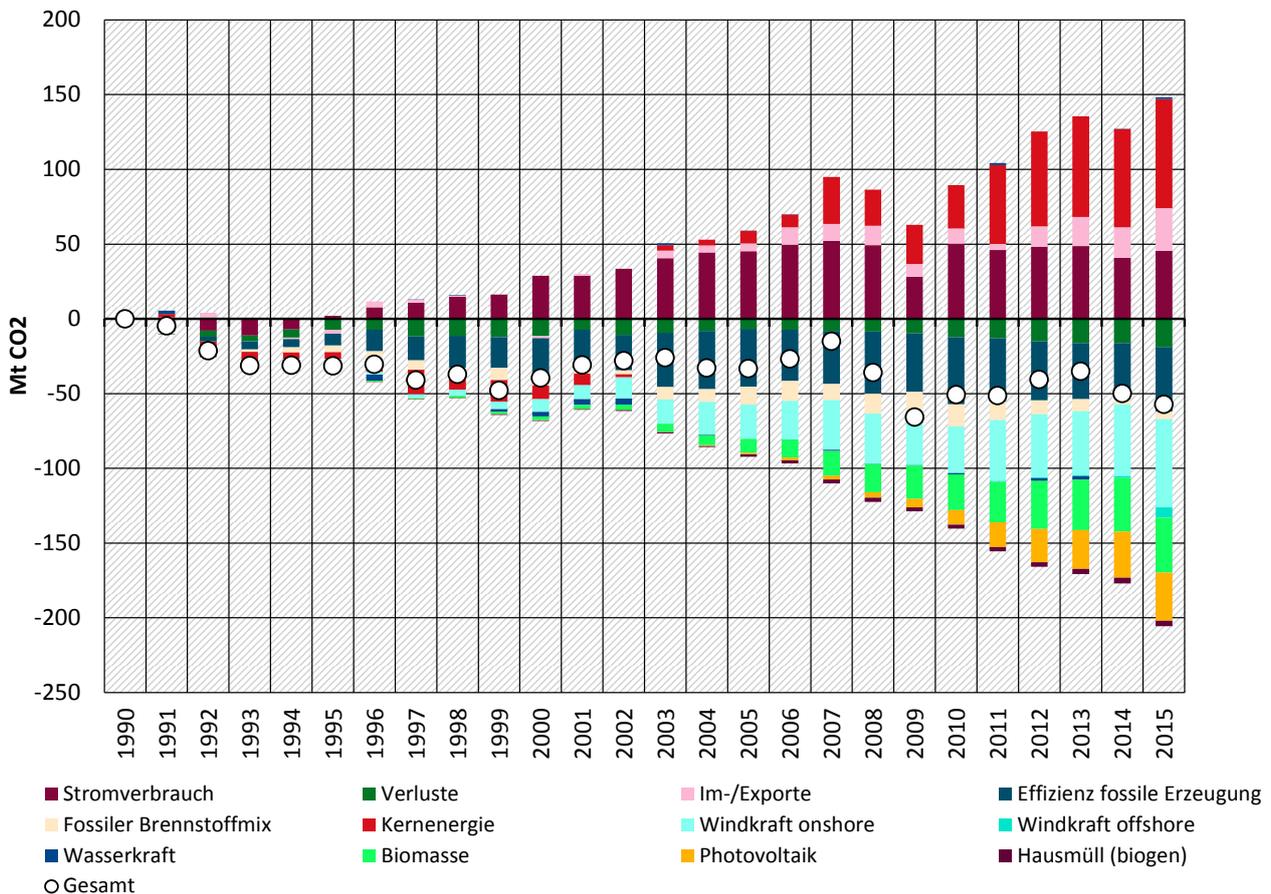
In Abbildung 8 ist der Beitrag der erneuerbaren Energien einzeln dargestellt. Von den 137 Mio. t CO₂-Minderung im Jahr 2015 gegenüber 1990 entfallen 59 Mio. t auf Wind an Land, 40 Mio. t auf Biomasse inklusive biogenem Hausmüll, 32 Mio. t auf die Solarenergie und 7 Mio. t auf Wind auf See. Die Wasserkraft 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 vorhanden war wie heute, und hier 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.⁶

⁶ Biblis A: Stillstand Januar bis Dezember 2007 wegen Überprüfung des spezifikationsgerechten Einbaus von Dübeln; Biblis B: Stillstand von Januar bis November wegen Revision und Dübelanierungsprogramm; 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;

Für das Jahr 2009, in dem die CO₂-Emissionen ihr Minimum im Betrachtungszeitraum erreichten, zeigt die Dekompositionsanalyse deutlich den Einfluss des Endenergieverbrauchs, der in diesem Jahr besonders niedrig war. Hier zeigt sich der Effekt der Wirtschaftskrise, die zu einer niedrigeren Stromnachfrage geführt hat.

Abbildung 8: Komponentenzerlegung der CO₂-Emissionen des Stroms seit 1990 (erneuerbare Energien einzeln dargestellt)



Quelle: Eigene Berechnung

3.3.2.2 Jahr-auf-Jahr-Analyse

Statt gegenüber 1990 kann die Veränderung der CO₂-Emissionen auch von einem Jahr aufs nächste analysiert werden. Abbildung 9 zeigt den Einfluss aller Treiber im Stromsektor jeweils für die Veränderung gegenüber dem Vorjahr. Dabei fällt auf, dass sich auch in der Betrachtung von Jahr zu Jahr die meisten Treiber als tendenziell emissionssteigernd oder emissionsenkend einordnen lassen.

Der in den meisten Jahren steigende **Endenergieverbrauch** hat entsprechend zu mehr Emissionen beigetragen. Ausnahmen mit sichtbarem, emissionsminderndem Effekt sind die Jahre 1991-93, 2008 und 2009 sowie 2011 und 2014. Der Rückgang in den Jahren nach der Wiedervereinigung ist auf den Zusammenbruch eines wesentlichen Teils der ostdeutschen Industrie zurückzuführen. Für 2009 ist

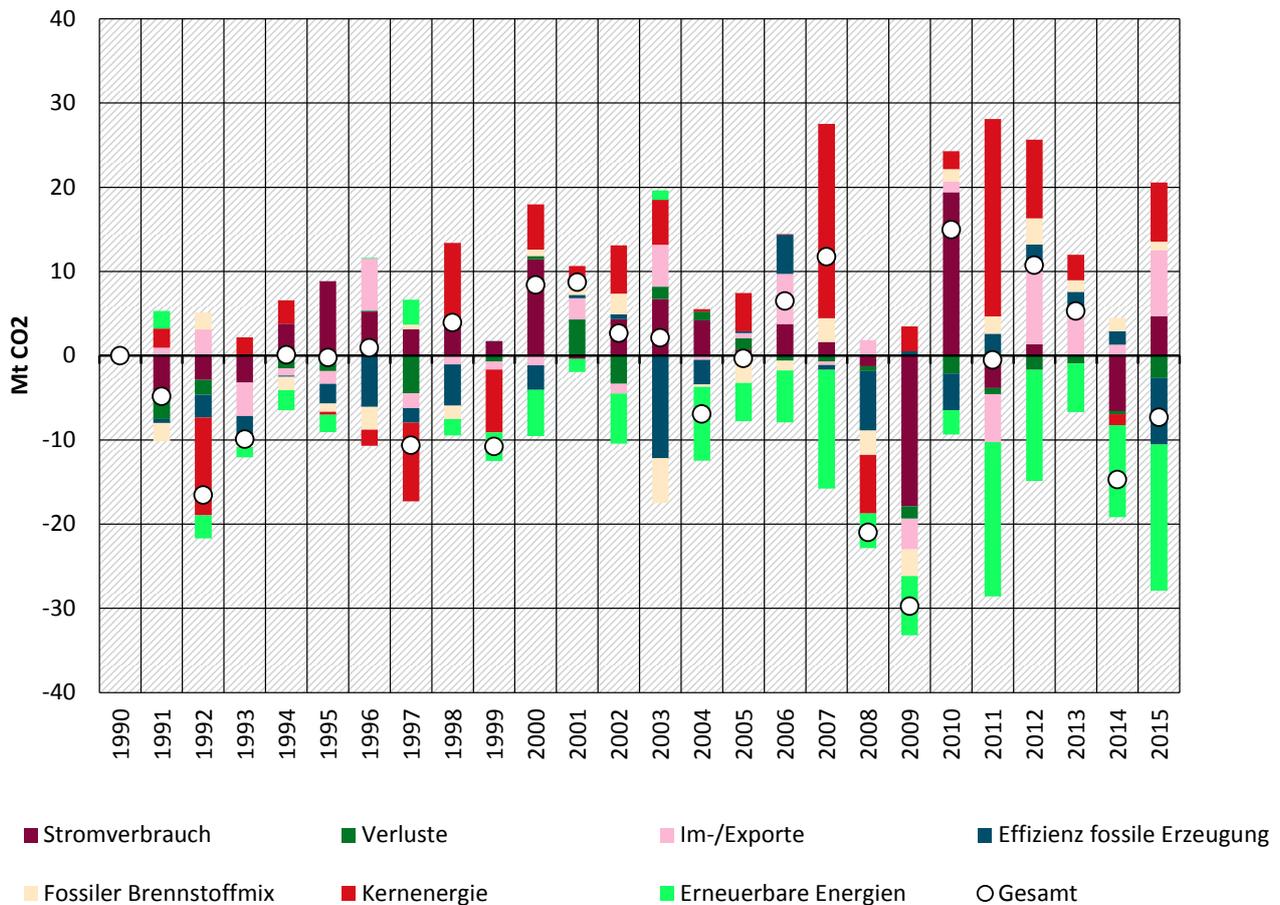
Krümmler: Reaktorschnellabschaltung Ende Juni wegen Ausfall der Eigenbedarfsversorgung aufgrund eines Kurzschlusses in einem Maschinentransformator mit Brandfolge, Stillstand bis Jahresende. (atw – Internationale Zeitschrift für Kernenergie 2008)

der infolge der Wirtschaftskrise gesunkene Endenergieverbrauch, wie bereits im vorangegangenen Abschnitt dargestellt, der Haupttreiber für den Rückgang der Emissionen gegenüber dem Vorjahr.

Die jährliche Veränderung der **Kernenergie** hat, da ihr Anteil im Betrachtungszeitraum insgesamt sinkt, in den meisten Jahren zu einem Anstieg der Emissionen beigetragen. Auch hier ist das Jahr 2007 interessant: Gegenüber dem Vorjahr verursacht der Wegfall von Stromerzeugung aus Atomkraftwerken 23 Mio. t CO₂ mehr. Gleichzeitig senken die erneuerbaren Energien die Emissionen gegenüber dem Vorjahr um 14 Mio. t. Einen ähnlichen Effekt sieht man auch im Jahr 2011. Durch die endgültige Stilllegung von Biblis A und B, Neckarwestheim I, Brunsbüttel, Isar 1, Krümmel, Philippsburg 1 und Unterweser in der Folge des Reaktorunglücks von Fukushima reduzierte sich die Stromerzeugung aus Kernenergie gegenüber dem Vorjahr um fast ein Viertel. Dies führt zu einem emissionssteigernden Effekt in Höhe von 24 Mio. t gegenüber dem Vorjahr. Gleichzeitig stieg von 2010 auf 2011 die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien um 18%. Dies wirkt sich mit einer Minderung von 19 Mio. t auf die CO₂-Emissionen aus. In Kombination mit den kleinen Effekten der anderen Treiber, insbesondere einem Rückgang des Exportsaldos im Jahr 2011, führt dies dazu, dass trotz Abschaltung der acht Atomkraftwerke die Emissionen gegenüber dem Vorjahr gleich bleiben.

Die **erneuerbaren Energien** tragen in fast allen Jahren zum Sinken der Emissionen gegenüber dem Vorjahr bei. Einzige Ausnahmen sind die Jahre 1991, 1997 und 2003, in denen der Anteil der erneuerbaren Energien gegenüber dem jeweiligen Vorjahr leicht sank, was zu einem leichten Anstieg der Emissionen führte. In allen drei Jahren war hierfür ein Rückgang der Stromerzeugung aus Wasserkraft gegenüber dem Vorjahr die Ursache⁷.

⁷ Stromerzeugung aus Wasserkraft ist in der Grafik nicht einzeln dargestellt, sondern in erneuerbaren Energien enthalten.

Abbildung 9: Komponentenzerlegung der jährlichen Entwicklung der CO₂-Emissionen des Stroms (erneuerbare Energien zusammengefasst)

Quelle: Eigene Berechnung

Die jährliche Veränderung der **Effizienz der fossilen Erzeugung** macht sich im Betrachtungszeitraum sowohl emissionssteigernd als auch emissionsenkend bemerkbar, wobei sowohl nach Anzahl der Jahre als auch nach Gesamtbeitrag die Senkung der Emissionen überwiegt.

Die jährliche Veränderung der **Verluste** (Kraftwerkseigenverbrauch, Pumpstromverluste, Netzverluste) ist auch in der Betrachtung von Jahr zu Jahr ein kleiner Treiber. Auch sie tragen in manchen Jahren zur Steigerung, in anderen zur Senkung der Emissionen bei, wobei der emissionsenkende Effekt größer ist.

Die jährliche Änderung der **Emissionsintensität** führt sowohl zu Emissionssteigerungen als auch zu Emissionsminderungen, über alle Jahre hinweg betrachtet ist der Effekt in etwa ausgeglichen.

Auch der **Import-Export-Saldo** im Vergleich zum jeweiligen Vorjahr wirkt sich je nach Jahr verschieden aus. Im gesamten Betrachtungszeitraum halten sich die emissionssteigernden Effekte und die emissionsenkenden Effekte nach Anzahl der Jahre die Waage, betrachtet man die Höhe der Beiträge überwiegt jedoch der emissionssteigernde Effekt deutlich.

3.4 Industrierwärme

3.4.1 Identifikation der Treiber

Die Industrie war 2015 nach der Stromerzeugung und dem Straßenverkehr die dritt wichtigste Quelle von Treibhausgasemissionen in Deutschland. Eine besondere Bedeutung haben hierbei die Emissionen aus der Wärmeerzeugung. Im Folgenden wird daher eine Dekompositionsanalyse der CO₂-Emissionen der Industrierwärme durchgeführt. Dabei werden – entsprechend der Konvention der Methodik des nationalen Treibhausgasinventars – ausschließlich die *direkten* CO₂-Emissionen betrachtet.

Um dies zu tun, werden zunächst die wesentlichen Treiber identifiziert, die eine Veränderung der CO₂-Emissionen der Industrierwärme über die Zeit verursachen und dann in Zusammenhang miteinander gesetzt. Industrie umfasst dabei das verarbeitende Gewerbe (CRF 1.A.2), Raffinerien (CRF 1.A.1.b) sowie Kokereien und die sonstige Herstellung von Brennstoffen (CRF 1.A.1.c). Ebenfalls enthalten sind dabei die Emissionen aus der Wärmeerzeugung in industriellen KWK-Anlagen.

In dieser Abgrenzung entfielen 178 Mt CO₂ im Jahr 1990 auf die Industrierwärme, die bis 2015 auf 98 Mt CO₂ zurückgingen. Der Anteil der CO₂-Emissionen der Industrierwärme an den gesamten energiebedingten CO₂-Emissionen sank von 18 % im Jahr 1990 auf 13 % im Jahr 2015.

Die Entwicklung der CO₂-Emissionen der Industrierwärme wird über die folgende Dekompositionsformel beschrieben:

$$CO_2 \text{ Industrie} = BIP \cdot \frac{BPW}{BIP} \cdot \frac{EEV_{\text{WaermeInd}}}{BPW} \cdot \frac{EEV_{\text{fossilWaermeInd}}}{EEV_{\text{WaermeInd}}} \cdot \frac{CO_2 \text{ WaermeInd}}{EEV_{\text{fossilWaermeInd}}}$$

Die einzelnen Terme beschreiben dabei folgende Treiber:

Die **Wirtschaftsentwicklung (BIP)** ist eine wesentliche Treibergröße. Eine stärkere Wirtschaftsentwicklung führt im Allgemeinen zu mehr Emissionen.

Der **Industrieanteil am BIP** ($\frac{BPW}{BIP}$), berechnet als Anteil des Bruttoproduktionswerts der Industrie am gesamten Bruttoinlandsprodukt, beschreibt die Bedeutung der Industrie an der gesamten wirtschaftlichen Aktivität. Eine Verschiebung hin zu einer Dienstleistungsgesellschaft führt zu einer Senkung der CO₂-Emissionen der Industrie, wohingegen eine Re-Industrialisierung emissionstreibend wirkt.

Die **Wärmeintensität** ($\frac{EEV_{\text{WaermeInd}}}{BPW}$) bildet ab, wieviel Wärme in der Industrie benötigt wird, um eine Einheit Bruttoproduktionswert zu generieren. Wird weniger Wärme benötigt, um den gleichen Wert zu erzielen, ist die Wärmeintensität niedriger und dementsprechend sind auch die CO₂-Emissionen niedriger.

Der **Erneuerbare Anteil am Wärmebedarf** ($\frac{EEV_{\text{fossilWaermeInd}}}{EEV_{\text{WaermeInd}}}$) enthält im Zähler des Quotienten indirekt den Einfluss von erneuerbaren Energien auf die Emissionsentwicklung der Industrierwärme. Wenn der erneuerbare Anteil ansteigt, sinkt gleichzeitig der fossile Anteil und somit die CO₂-Emissionen.

Der **fossile Brennstoffmix** ($\frac{CO_2 \text{ WaermeInd}}{EEV_{\text{fossilWaermeInd}}}$) beschreibt den Einfluss unterschiedlicher fossiler Energieträger auf den Emissionsverlauf. Unterschiedliche Energieträger (z. B. Erdgas versus Heizöl) haben unterschiedliche Emissionsfaktoren. Somit führt ein Wechsel von Heizöl zu Erdgas zu niedrigeren Emissionen. Dies wird mit diesem Treiber abgebildet.

Analysiert wird der Zeitraum ab dem Jahr 1990, also der komplette Zeitraum, für den Treibhausgasinventare zur Verfügung stehen.

Bei der Entwicklung der Dekompositionsformel wurden Alternativen geprüft und verworfen. Zunächst gab es keinen Treiber für den Industrieanteil am BIP, sondern die einzige volkswirtschaftliche Größe

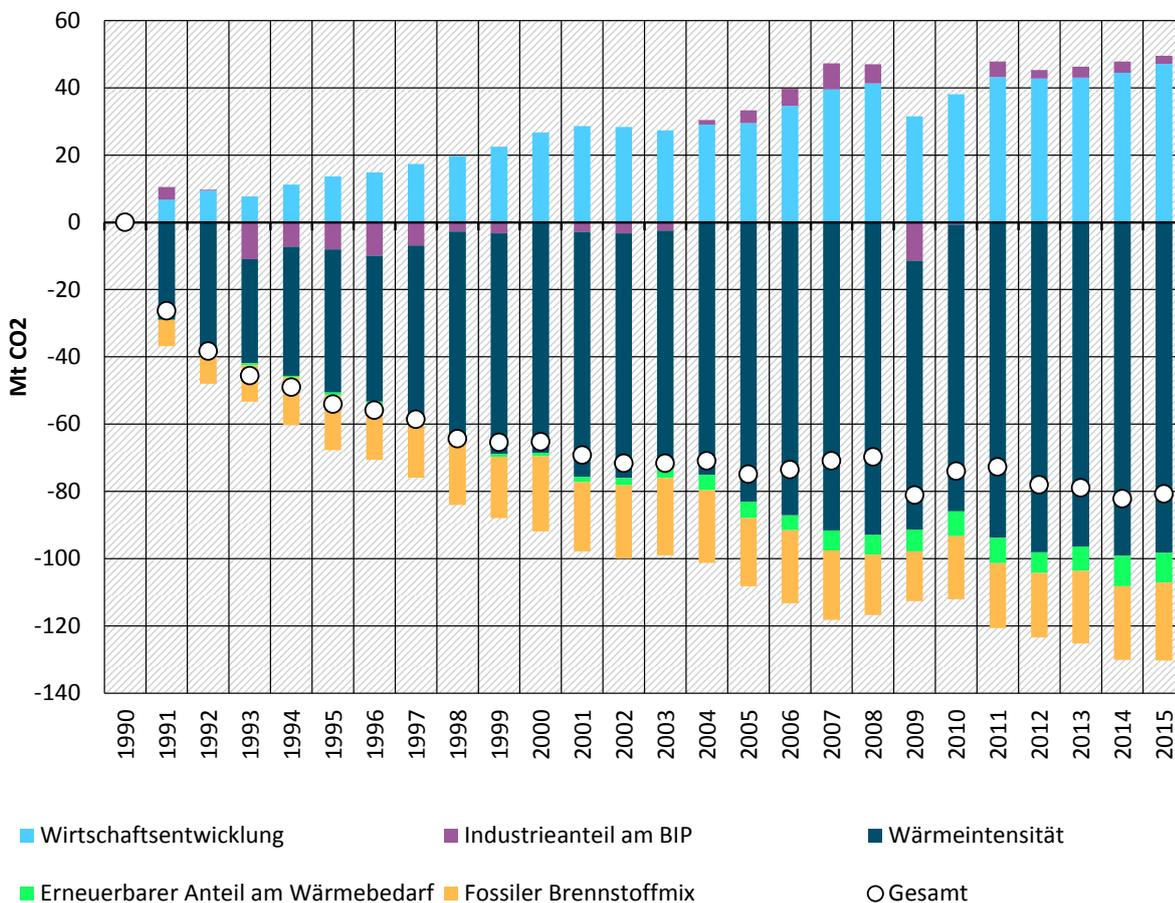
in der Formel war der Wohlstand. Es wurde anschließend versucht, den Industrieanteil am BIP über die Bruttowertschöpfung der Industrie abzubilden. Hier stellte sich heraus, dass in der Zeitreihe der Bruttowertschöpfung verzerrende Sprünge vorhanden sind. Daher wurde als Alternative der Bruttowertschöpfung der Bruttowertschöpfung gewählt⁸. Zudem wurde ursprünglich eine engere Abgrenzung der Industrie gewählt, die nur das verarbeitende Gewerbe umfasste.

3.4.2 Ergebnisse

3.4.2.1 Analyse gegenüber 1990

Die folgende Abbildung 10 zeigt die Anteile, die die Emissionstreiber Wirtschaftsentwicklung, Industrieanteil am BIP, Wärmeintensität, erneuerbarer Anteil am Wärmebedarf und fossiler Brennstoffmix zur Veränderung der energetischen CO₂-Emissionen der Industriegewerke gegenüber 1990 beitrugen. Der Effekt jedes Jahres bezieht sich immer auf die Veränderung gegenüber 1990 und berücksichtigt damit auch alle vorangegangenen Jahre.

Abbildung 10: Komponentenzerlegung der CO₂-Emissionen der Industriegewerke seit 1990



⁸ **Der Bruttowertschöpfungswert** bildet den gesamten Wert eines Produktionsergebnisses ab. Die Werte der Vorleistungen werden dabei berücksichtigt. Die abgesetzten Produkte werden mit dem Marktpreis bewertet und die selbst erstellten Anlagen und Bestandsveränderungen an Halb- und Fertigerzeugnissen mit Herstellungskosten.

Die Bruttowertschöpfung hingegen berücksichtigt die Vorleistungen nicht. Sie ergibt sich aus dem Gesamtwert der im Produktionsprozess erzeugten Waren und Dienstleistungen (Produktionswert), abzüglich des Werts der Vorleistungen. Werden vom Produktionswert die Vorleistungen abgezogen, ergibt sich die Bruttowertschöpfung. Die Bruttowertschöpfung kann daher auch als Maß des geschaffenen Mehrwertes durch eine wirtschaftliche Aktivität interpretiert werden.

Quelle: Eigene Berechnung

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). 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 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. Der Industrieanteil am BIP (lila Segment) führte in den 1990er- und den frühen 2000er-Jahren zu leicht steigenden Emissionen: Auf einige Jahre mit tendenzieller De-Industrialisierung seit Mitte der 2000er-Jahre folgte 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 (orangenes Segment) ist deutlich emissionsärmer geworden, der durchschnittliche Emissionsfaktor sank von 68 t CO₂/TJ im Jahr 1990 um 16 % auf 58 t CO₂/TJ im Jahr 2015. Dadurch wurden 23 Mt CO₂ im Jahr 2015 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. 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 (hellgrünes Segment). Einen merklichen Effekt haben die erneuerbaren Energien erst seit 2003. Dies ist teilweise ein statistisches Artefakt, denn mit der Novelle des Energiestatistikgesetzes 2003 sind die erneuerbaren Energien besser erfasst worden.

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.

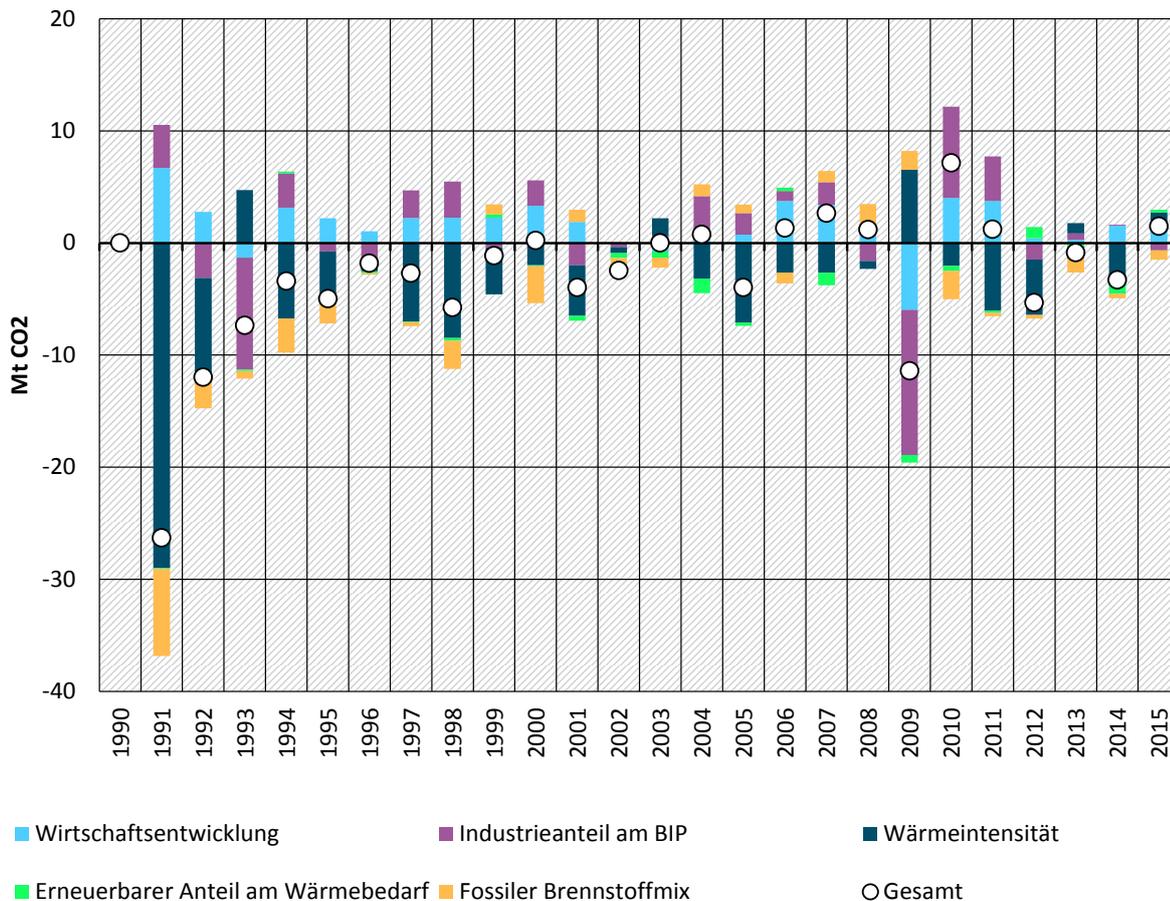
3.4.2.2 Jahr-auf-Jahr-Analyse

Die folgende Abbildung zeigt die Anteile, die die Emissionstreiber Wirtschaftsentwicklung, Industrieanteil am BIP, Wärmeintensität, erneuerbarer Anteil am Wärmebedarf und fossiler Brennstoffmix zur Veränderung der energetischen CO₂-Emissionen der Industriewärme gegenüber dem Vorjahr beitragen. Der Effekt jedes Jahres bezieht sich immer auf die Veränderung der CO₂-Emissionen gegenüber dem Vorjahr und kann daher zur Erkennung außergewöhnlicher Ereignisse dienen, die in der Betrachtung gegenüber dem Ausgangsjahr 1990 nicht sichtbar werden. Im Folgenden werden einige markante Punkte anhand historischer Ereignisse plausibilisiert.

Die deutlichste Emissionsänderung innerhalb eines Jahres erfolgte im Jahr 1991. Der stärkste Treiber war hier die deutlich verbesserte Wärmeintensität, beeinflusst durch den wirtschaftlichen Niedergang der in Teilen sehr ineffizienten ostdeutschen Wirtschaftsbereiche.

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. Auch zeigt der 2009 vergleichsweise deutliche Emissionsrückgang durch den Industrieanteil am BIP, dass die Industrie stärker von der Wirtschaftskrise betroffen war als andere Bereiche der deutschen Volkswirtschaft. Gleichzeitig war die Wärmeintensität im Krisenjahr 2009 deutlich emissionstreibend, während sie sonst von Jahr zu Jahr in der Regel zu Emissionsenkungen führte.

Abbildung 11: Komponentenzerlegung der jährlichen Entwicklung der CO₂-Emissionen der Industrie-wärme



Quelle: Eigene Berechnung

3.5 Raumwärme

3.5.1 Identifikation der Treiber

Im aktuellen Wohnbestand wird der größte Teil der Energie für Raumwärme, also die Beheizung der Wohnflächen, aufgewendet. Im Folgenden wird daher eine Dekompositionsanalyse für die Raumwärme in privaten Haushalten durchgeführt. Dabei werden – entsprechend der Konvention der Methodik des nationalen Treibhausgasinventars – ausschließlich die *direkten* CO₂-Emissionen betrachtet.

Um dies zu tun werden die wesentlichen Treiber identifiziert, die eine Veränderung der CO₂-Emissionen der privaten Haushalte (CRF 1.A.4.b) über die Zeit verursachen und in Zusammenhang miteinander gesetzt.

Im Jahr 1990 emittierten die privaten Haushalte 129 Mt CO₂ und gingen bis zum Jahr 2015 auf 85 Mt CO₂ zurück. Der Anteil der CO₂-Emissionen der Raumwärme an den gesamten energiebedingten CO₂-Emissionen sank von 13 % im Jahr 1990 auf 11 % im Jahr 2015.

Die Entwicklung der CO₂-Emissionen der Raumwärme der privaten Haushalte wird über die folgende Dekompositionsformel beschrieben:

$$CO_{2Raumwärme} = Bev \cdot \frac{Fläche}{Bev} \cdot \frac{EEV}{Fläche} \cdot \frac{EEV_{fossil}}{EEV} \cdot \frac{CO_2}{EEV_{fossil}}$$

Die einzelnen Terme beschreiben dabei folgende Treiber:

Die **Bevölkerung** (Bev) treibt CO_2 -Emissionen, indem sie Wohnraum nutzt. Je höher die Bevölkerung für desto mehr Personen muss Raumwärme zur Verfügung gestellt werden.

Die **Wohnfläche pro Person** ($\frac{Fläche}{Bev}$) beschreibt wieviel Wohnraum zur Verfügung steht. Ein größerer Wohnflächenbedarf pro Einwohner führt zu höherem Raumwärmebedarf und somit höheren Emissionen.

Die **Gebäudeeffizienz** ($\frac{EEV}{Fläche}$) beschreibt den energetischen Standard von Wohngebäuden. Diese Größe beschreibt beispielsweise den Einfluss von energetischer Dämmung von Wohngebäuden auf die Emissionsentwicklung.

Der **Anteil erneuerbare Energien** ($\frac{EEV_{fossil}}{EEV}$) enthält im Zähler des Quotienten indirekt den Einfluss von erneuerbaren Energien auf die Emissionsentwicklung der Raumwärme. Wenn der erneuerbare Anteil ansteigt, sinkt gleichzeitig der fossile Anteil und somit die CO_2 -Emissionen.

Der **fossile Brennstoffmix** ($\frac{CO_2}{EEV_{fossil}}$) beschreibt den Einfluss unterschiedlicher fossiler Energieträger auf den Emissionsverlauf. Unterschiedliche Energieträger (z. B. Erdgas versus Heizöl) haben unterschiedliche Emissionsfaktoren. Somit führt ein Wechsel von Heizöl zu Erdgas zu niedrigeren Emissionen. Dies wird mit diesem Treiber abgebildet.

Raumwärme wird nur zu einem sehr geringen Anteil aus Strom bereitgestellt.⁹ Der größte Teil des Stromverbrauchs der privaten Haushalte wird für andere Zwecke, insbesondere für Prozesswärme (d.h. vor allem Kochen und Backen), Kühlgeräte und Informations- und Kommunikationstechnik verbraucht. Leider steht keine komplette Zeitreihe der Anwendungsbilanzen zur Verfügung. Daher wurde vereinfacht der komplette Stromverbrauch der privaten Haushalte in dieser Komponentenerlegung nicht berücksichtigt.

Analysiert wird der Zeitraum ab dem Jahr 1990, also der komplette Zeitraum, für den Treibhausgasinventare zur Verfügung stehen.

Die ursprüngliche Idee war es, den gesamten Raumwärmebedarf einschließlich gewerblicher Flächen in die Analyse einzubeziehen. Nicht schließbare Datenlücken (fehlende Daten zu beheizten Gewerbeflächen) erlaubten dieses Vorgehen leider nicht.

Ein Treiber für Emissionsveränderungen von einem Jahr zum nächsten liegt in der unterschiedlichen Witterung einzelner Jahre begründet: In manchen Jahren sind die Winter kälter und/ oder länger als in anderen und somit ergeben sich für diese zum Teil deutlich andere Raumwärmenachfragen. Dieser Effekt lässt sich prinzipiell über die Messgröße Heizgradtage erfassen.

Die verwendete Dekompositionsmethodik setzt voraus, dass die einzelnen Treiber (im Idealfall) komplett voneinander unabhängig sind bzw. (in der Realität) nur wenig miteinander korrelieren. Werden in der Dekomposition korrelierende Treiber verwendet, so führt das dazu, dass die Dekompositionsmethode zwar Ergebnisse zu Emissionswirkungen beider Treiber berechnet. Diese Emissionswirkung der beiden Treiber haben dann absolute (nahezu) den gleichen Wert, aber unterschiedliche Vorzeichen, so dass sie sich in Summe nahezu aufheben.

Die Raumwärmenachfrage und die Heizgradtage korrelieren aber recht deutlich zueinander, noch stärker korreliert sind die jährlichen Änderungen von Raumwärmenachfrage und Heizgradtagen. Da-

⁹ Laut Anwendungsbilanzen der AG Energiebilanzen (AGEB 2016a) betrug der Anteil von Strom an der Raumwärme in den Jahren 2013 bis 2015 um die 2 %.

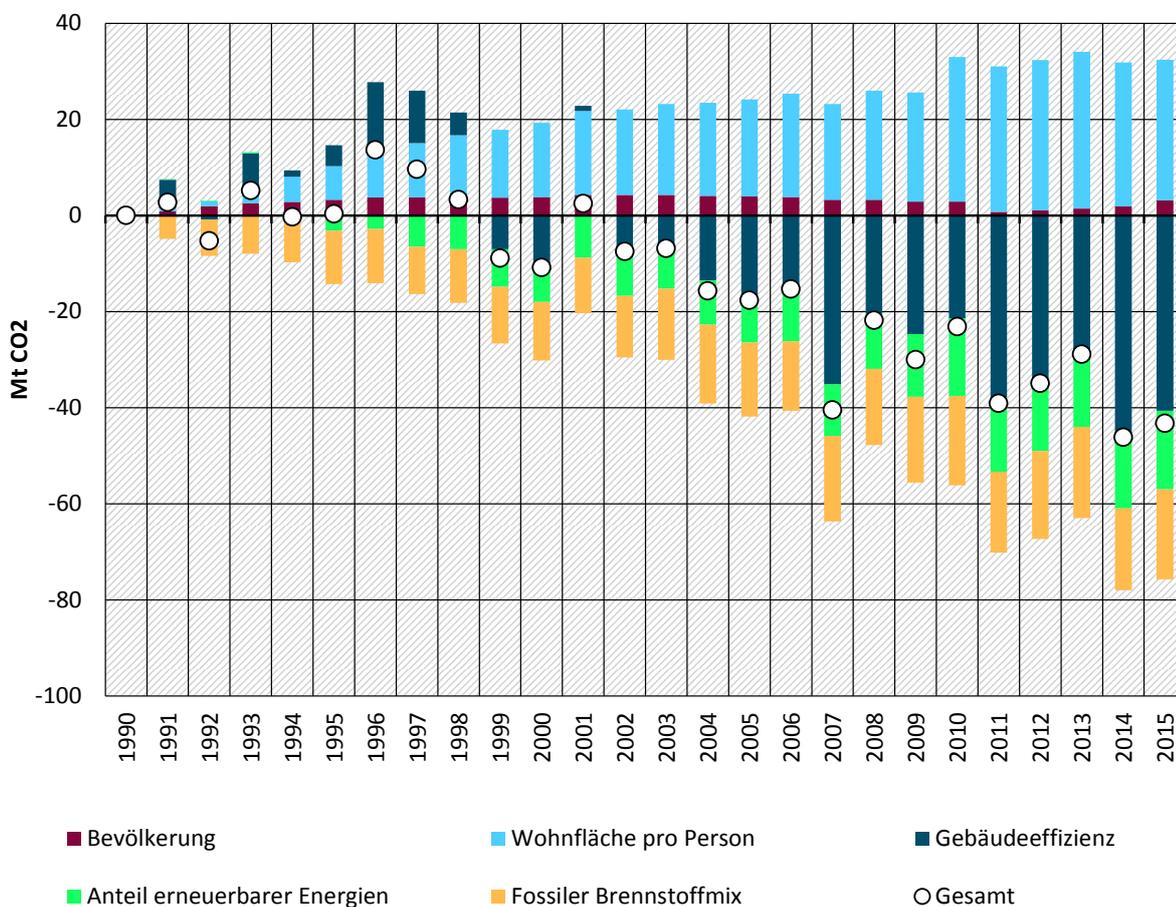
her wurden die Heizgradtage nicht in die Dekompositionsformel integriert, aber stattdessen im Folgenden separat zur Veranschaulichung der Entwicklung der Raumwärmenachfrage herangezogen (siehe Abschnitt 3.5.2.2).

3.5.2 Ergebnisse

3.5.2.1 Analyse gegenüber 1990

Die folgende Abbildung zeigt die Anteile, die die Emissionstreiber Bevölkerung, Wohnfläche pro Person, Gebäudeeffizienz, Anteil erneuerbarer Energien und fossiler Brennstoffmix zur Veränderung der direkten CO₂-Emissionen privater Haushalte gegenüber 1990 beitrugen. Der Effekt jeden Jahres bezieht sich immer auf die Veränderung gegenüber 1990 und berücksichtigt damit auch alle vorangegangenen Jahre mit.

Abbildung 12: Komponentenzerlegung der Entwicklung der CO₂-Emissionen der Raumwärme seit 1990



Quelle: Eigene Berechnung

Stärkster Treiber der Emissionsentwicklung im Bereich der Raumwärme ist die Gebäudeeffizienz (dunkelblaues Segment). Diese hat sich zwischen 1990 und 2015 um 32 % verbessert und so zu Einsparung von 41 Mt CO₂ zwischen 1990 und 2015 geführt. Diese Verbesserung ist zum einen durch

schärfere energetische Standards bei neuen Wohngebäuden, zum anderen durch energetische Sanierungen (zum Beispiel durch Dämmung) von bestehenden Wohngebäuden zurückzuführen.¹⁰

Der zweitstärkste Treiber ist eine deutlich gestiegene Wohnfläche pro Person (hellblaues Segment). Im Jahr 1990 standen im Schnitt noch 34,8 m²/Person zur Verfügung, stieg aber auf 45,9 m²/Person im Jahr 2015 an. Das heißt also, dass im Schnitt 32 % mehr Wohnfläche pro Person beansprucht wird. Dies steigerte die Emissionen im Jahr 2015 um etwa 29 Mt. CO₂. Zusätzlich führte eine leichte Steigerung der Bevölkerung (lila 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 (hellgrünes Segment) ist von 2 % im Jahr 1990 auf 16 % im Jahr 2015 gestiegen und dadurch wurden 16 Mt CO₂ eingespart (2015). Der fossile Brennstoffmix (orangenes Segment) ist deutlich emissionsärmer geworden, der durchschnittliche Emissionsfaktor sank von 67 t CO₂/TJ im Jahr 1990 um 16 % auf 56 t CO₂/TJ im Jahr 2015. 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 enthalten¹¹, deren Emissionen nicht direkt bei den privaten Haushalten sondern in der Energiewirtschaft erfasst werden.

3.5.2.2 Jahr-auf-Jahr-Analyse

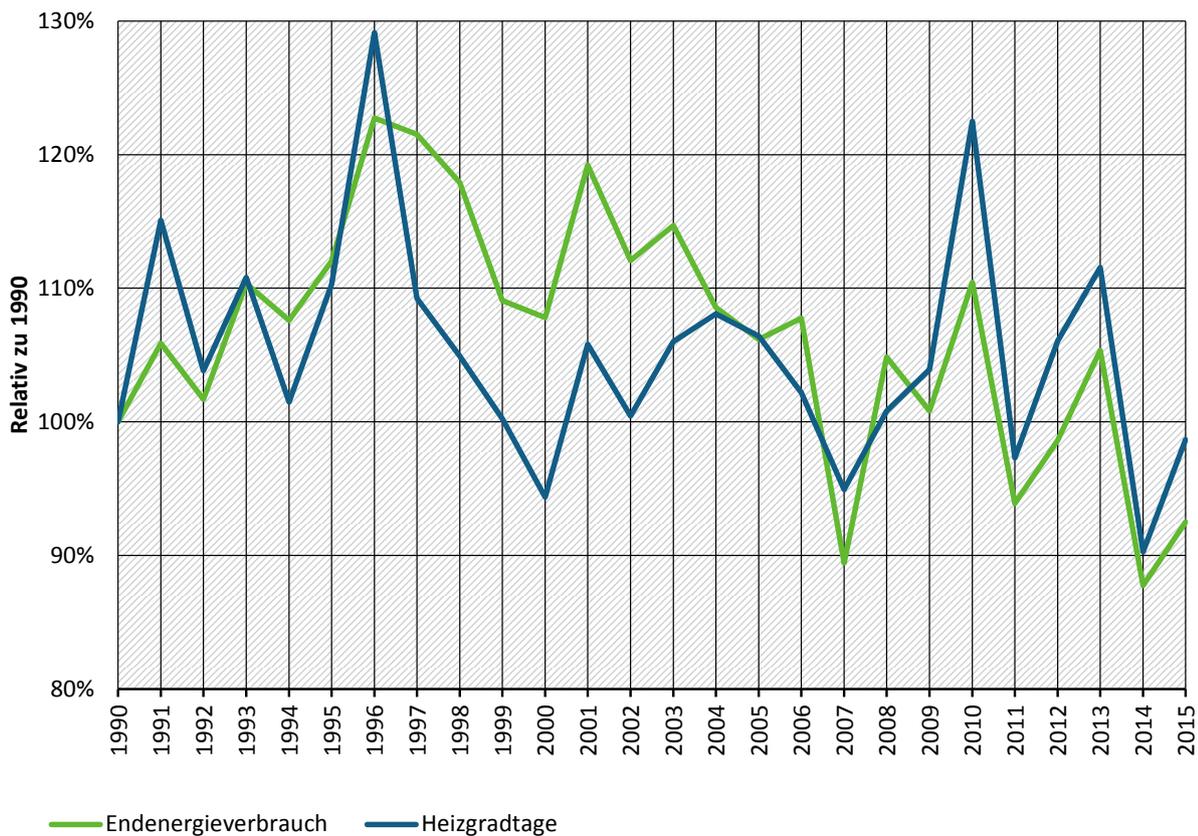
Die Jahr-zu-Jahr-Änderungen sind stark von Witterungsschwankungen überlagert. Diese Kurzzeitschwankungen lassen sich aus methodischen Gründen nicht in die zu dekomponierende Formel einbauen, daher erfolgt hier nur eine qualitative Beschreibung: Wie Abbildung 13 zeigt, zeigt die veränderte Witterung (gemessen in Heizgradtagen) für die meisten Jahre einen deutlichen Zusammenhang zur Veränderung des Endenergieverbrauchs (ohne Strom). Besonders deutlich wird das an den extremen Jahren: In den besonders warmen Jahren – wie beispielsweise 2007 und insbesondere 2014 – ist der Endenergieverbrauch deutlich niedriger als im Mittel. In besonders kalten Jahren – wie beispielsweise 1996 und 2010 – ist der Endenergieverbrauch deutlich höher als im Mittel.

Allerdings ist zu beachten, dass es beim Endenergieverbrauch der privaten Haushalte – und damit deren CO₂-Emissionen – methodische Unsicherheiten gibt: Die AG Energiebilanzen erhebt den Endenergieverbrauch der privaten Haushalte über Absatzstatistiken (AGEB 2015). Insbesondere bei gut lagerbaren Energieträgern, allen voran Heizöl, kann diese Erhebungsmethode zu einer teilweisen Verschiebung von Energieverbräuchen zwischen einzelnen Jahren führen. Denn neben den tatsächlichen, durch die Witterung beeinflussten Energieverbräuchen, bestimmen auch weitere Faktoren den Absatz von Energieträgern an private Haushalte. Ein wesentlicher Faktor sind hier auch die deutlichen und zum Teil sehr kurzfristigen Schwankungen der Energiepreise. So gab es 2008 das bisherige Maximum der Heizölpreise, gefolgt von einem sehr deutlichen Preisrückgang im Jahr 2009. Auch die divergierende Entwicklung von Endenergieverbrauch und Witterung in den Jahren nach dem sehr kalten Jahr 1996 lassen sich möglicherweise durch eine Kombination aus Nachholeffekten aufgrund des sehr kalten Winters und deutlich gesunkenen Energiepreisen erklären. Der Einfluss der Energieträgerpreise kann hier aber nicht weiter analysiert werden, da es zu methodischen Problemen führt, die Energiepreise in die Dekompositionsformel zu integrieren.

¹⁰ So wurden beispielsweise zwischen 2005 und 2015 etwa 2,3 Millionen Wohnungen mit Fördermitteln der bundeseigenen KfW gefördert (IWU und Fraunhofer IFAM 2016).

¹¹ Daher wurde eine separate Dekompositionsanalyse für die Fernwärme durchgeführt, siehe Kapitel 3.6.

Abbildung 13: Endenergieverbrauch der Haushalte (ohne Strom) im Vergleich zur Witterung seit 1990



Quelle: Eigene Berechnung

3.6 Fernwärme

3.6.1 Identifikation der Treiber

Fernwärme wird in allen stationären Endverbrauchssektoren, also der Industrie, privaten Haushalten und im GHD-Sektor (Gewerbe, Handel und Dienstleistungen) genutzt. Die Emissionen der Fernwärmeerzeugung werden im Treibhausgasinventar nicht in den jeweiligen Endverbrauchssektoren sondern in der Energiewirtschaft bilanziert. Im Folgenden wird daher zusätzlich zu den Dekompositionsanalysen für die Industriewärme und die Raumwärme eine Dekompositionsanalyse für die Fernwärme durchgeführt. Dabei werden – entsprechend der Konvention der Methodik des nationalen Treibhausgasinventars – ausschließlich die *direkten* CO₂-Emissionen betrachtet.

Um dies zu tun werden die wesentlichen Treiber identifiziert, die eine Veränderung der CO₂-Emissionen der Fernwärme über die Zeit verursachen und in Zusammenhang miteinander gesetzt. Abgegrenzt wird die Fernwärmeversorgung als öffentliche Heizkraftwerke und Heizwerken (CRF 1.A.1.a).

Die Fernwärmeversorgung verursachte 44 Mt CO₂ im Jahr 1990, im Jahr 2003 (siehe unten) waren es 39 Mt CO₂ und im 33 Mt CO₂ im Jahr 2015. Der Anteil der CO₂-Emissionen der Fernwärme an den gesamten energiebedingten CO₂-Emissionen schwankte im Zeitraum von 1990 bis 2015 zwischen 3 % und 5 %.

Die Entwicklung der CO₂-Emissionen der Fernwärme wird über die folgende Dekompositionsformel beschrieben:

$$CO_{2\text{Fernwärme}} = FW_{Ver} \cdot \frac{FW_{Erz}}{FW_{Ver}} \cdot \frac{PEV}{FW_{Erz}} \cdot \frac{PEV_{fossil}}{PEV} \cdot \frac{CO_2}{PEV_{fossil}}$$

Die einzelnen Terme beschreiben dabei folgende Treiber:

Die **Fernwärmeverbrauch** (FW_{Ver}) beschreibt die Nachfrage nach Fernwärme. Beeinflusst wird dieser zum einen durch die Witterung, zum anderen durch einen möglichen Wechsel bei den Endverbrauchern von Wärmeerzeugern vor Ort (beispielsweise Ölheizungen) hin zu Fernwärmenutzung.

Die **Netzverluste** ($\frac{FW_{Erz}}{FW_{Ver}}$) beschreiben den Unterschied zwischen erzeugter und verbrauchter Fernwärme. Beim Transport von Fernwärme entstehen nicht unerhebliche Verluste. Verbesserungen bei der Fernwärmenetzinfrastruktur sowie Veränderung der Temperaturniveaus der Fernwärmenetze können Netzverluste verringern.

Die **Umwandlungseffizienz** ($\frac{PEV}{FW}$) beschreibt, wieviel Primärenergie (Kohle, Erdgas, Biomasse, etc.) eingesetzt werden muss, um eine bestimmte Menge an Fernwärme bereitzustellen. Er ist damit ein Maß für die Effizienz der Fernwärmeerzeugung. Der Primärenergiefaktor ist ein wesentlicher Treiber, denn je mehr Primärenergie für die gleiche Einheit Fernwärme benötigt wird, je ineffizienter die Fernwärmeerzeugung also ist, desto höher sind die Treibhausgasemissionen. Wesentlichen Einfluss auf diesen Treiber hat auch, ob die Fernwärme in Heizkraftwerken durch Kraftwärmekopplung (KWK) oder ungekoppelt in reinen Heizwerken erzeugt wird.

Der **Einfluss erneuerbarer Energien** ($\frac{PEV_{fossil}}{PEV}$) enthält im Zähler des Quotienten indirekt den Einfluss von erneuerbaren Energien auf die Emissionsentwicklung der Fernwärme. Wenn der erneuerbare Anteil ansteigt, sinkt gleichzeitig der fossile Anteil und somit die CO₂-Emissionen.

Der **fossile Brennstoffmix** ($\frac{CO_2}{PEV_{fossil}}$) beschreibt den Einfluss unterschiedlicher fossiler Energieträger auf den Emissionsverlauf. Unterschiedliche Energieträger (z. B. Erdgas versus Kohle) haben unterschiedliche Emissionsfaktoren. Somit führt ein Wechsel von Kohle zu Erdgas zu niedrigeren Emissionen. Dies wird mit diesem Treiber abgebildet.

In der Energiestatistik gab es zwischen 2002 und 2003 eine signifikante Änderung der Erhebungsgrundlage. Dies führte zu einem deutlichen Bruch in den für die Fernwärme relevanten Zeitreihen (DIW Berlin & EEFA 2009), die zu einer Ausweitung der umfassten Energieverbräuche um etwa ein Drittel führte. Eine solch starke methodische Änderung überfordert die verwendete Dekompositionsanalyse. Daher wurde im Folgenden das Jahr 2003 und nicht 1990 als Ausgangsjahr verwendet.

Bis einschließlich 2003 wurde auch Fernwärme aus Kernkraftwerken erzeugt. Dieser Anteil war aber sehr gering (etwa ein Promille des Umwandlungseinsatzes von allen Heizkraftwerken). Dieser sehr geringe und nur bis 2003 relevante nukleare Anteil wurde den fossilen Energieträgern zugeschlagen.

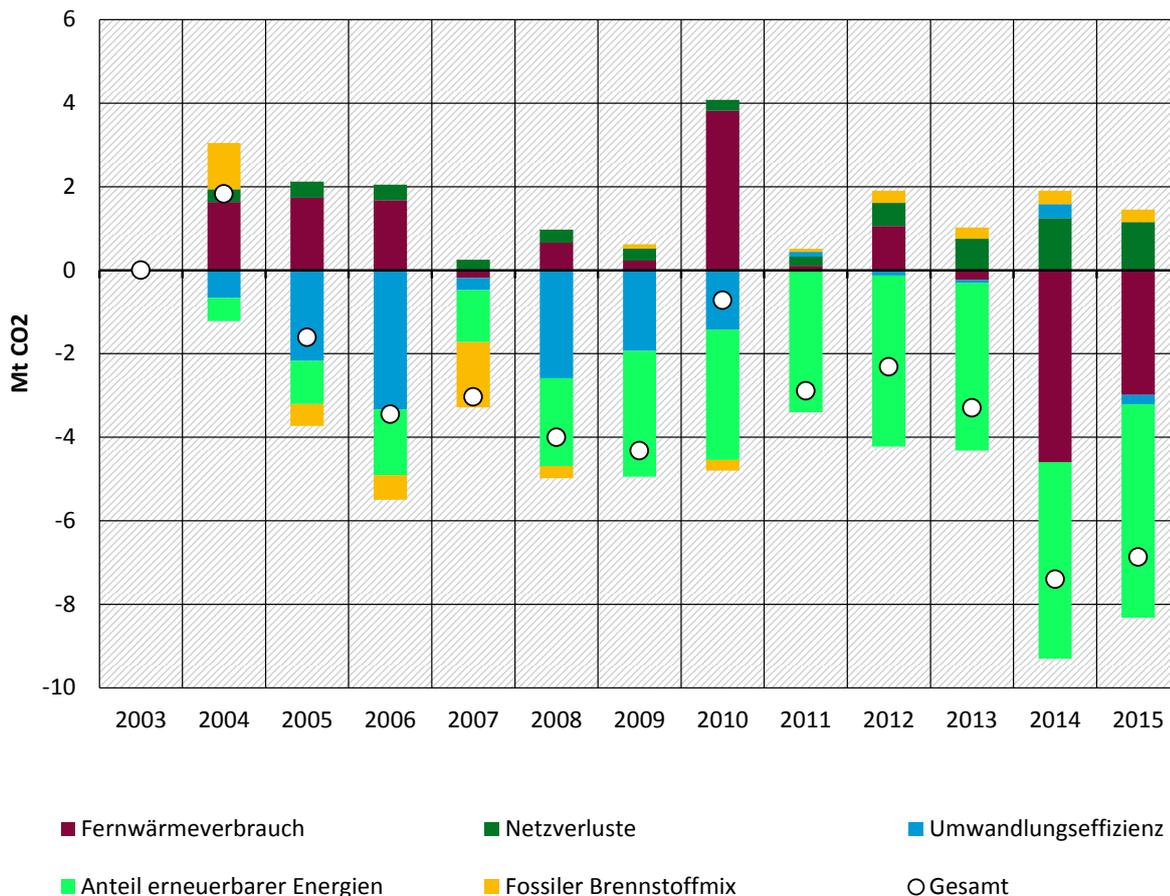
Die Witterung in Form von Heizgradtagen in die Dekompositionsformel aufzunehmen wurde – aus den gleichen Gründen wie bei der Raumwärme – verworfen.

3.6.2 Ergebnisse

3.6.2.1 Analyse gegenüber 2003

Die folgende Abbildung zeigt die Anteile, die die Emissionstreiber Fernwärmeverbrauch, Netzverluste, Umwandlungseffizienz, Umwandlungseffizienz, Anteil erneuerbarer Energien und der fossile Brennstoffmix zur Veränderung der direkten CO₂-Emissionen der Fernwärmeerzeugung gegenüber 2003 beitrugen. Der Effekt jeden Jahres bezieht sich immer auf die Veränderung gegenüber 2003 und berücksichtigt damit auch alle vorangegangenen Jahre mit.

Abbildung 14: Komponentenzerlegung der Entwicklung der CO₂-Emissionen der Fernwärme seit 2003



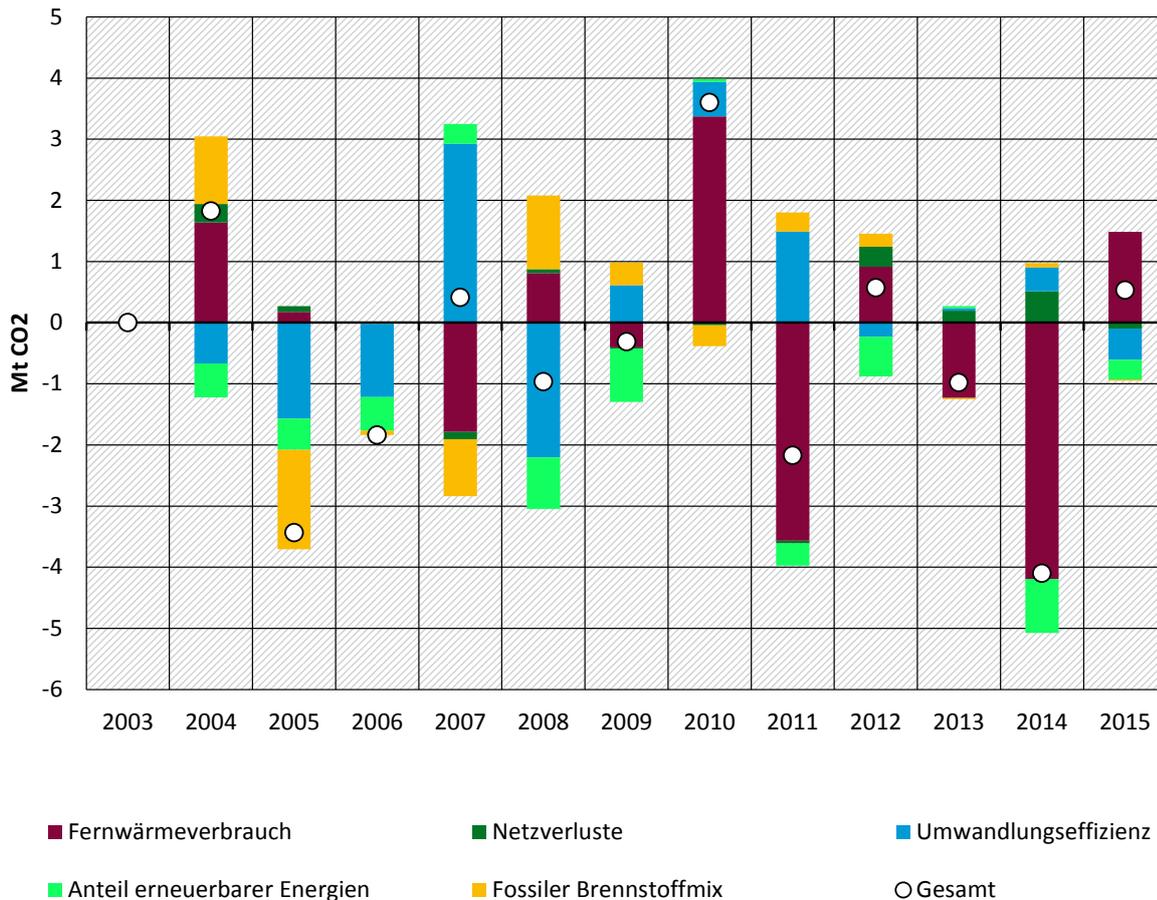
Quelle: Eigene Berechnung

Insgesamt sind die CO₂-Emissionen der Fernwärme zwischen 2003 und 2014 um 6,7 Mt CO₂ gesunken. Stärkster Treiber im Jahr 2014 ist die Fernwärmennachfrage (weinrotes Segment), mit einer Reduktion von 4,6 Mt CO₂. Allerdings ist die Fernwärmennachfrage stark witterungsabhängig (siehe nächster Abschnitt). Der gegenüber 2003 deutlich erhöhte Anteil erneuerbarer Energien (hellgrünes Segment) in der Fernwärme senkte die Emissionen 2014 um 4,2 Mt CO₂. Veränderte Netzverluste sind emissionstreibend, im Jahr 2014 führte dies zu 1,3 Mt zusätzlichen CO₂-Emissionen gegenüber 2003 (dunkelgrünes Segment). Eher untergeordnete Bedeutung und in der Zeitreihe schwankend sind die Auswirkungen der Veränderung des fossilen Brennstoffmixes (orangenes Segment) und der Umwandlungseffizienz (hellblaues Segment).

3.6.2.2 Jahr-auf-Jahr-Analyse

Die folgende Abbildung zeigt die Anteile, die die Emissionstreiber Fernwärmenachfrage, Netzverluste, Umwandlungseffizienz, Umwandlungseffizienz, Anteil erneuerbarer Energien und der fossile Brennstoffmix zur Veränderung der direkten CO₂-Emissionen der Fernwärmeerzeugung gegenüber dem Vorjahr beitrugen. Der Effekt jeden Jahres bezieht sich immer auf die Veränderung der CO₂-Emissionen gegenüber dem Vorjahr und kann daher zur Erkennung außergewöhnlicher Ereignisse dienen, die in der Betrachtung gegenüber dem Ausgangsjahr 2003 nicht sichtbar werden. Im Folgenden werden einige markante Punkte anhand historischer Ereignisse plausibilisiert.

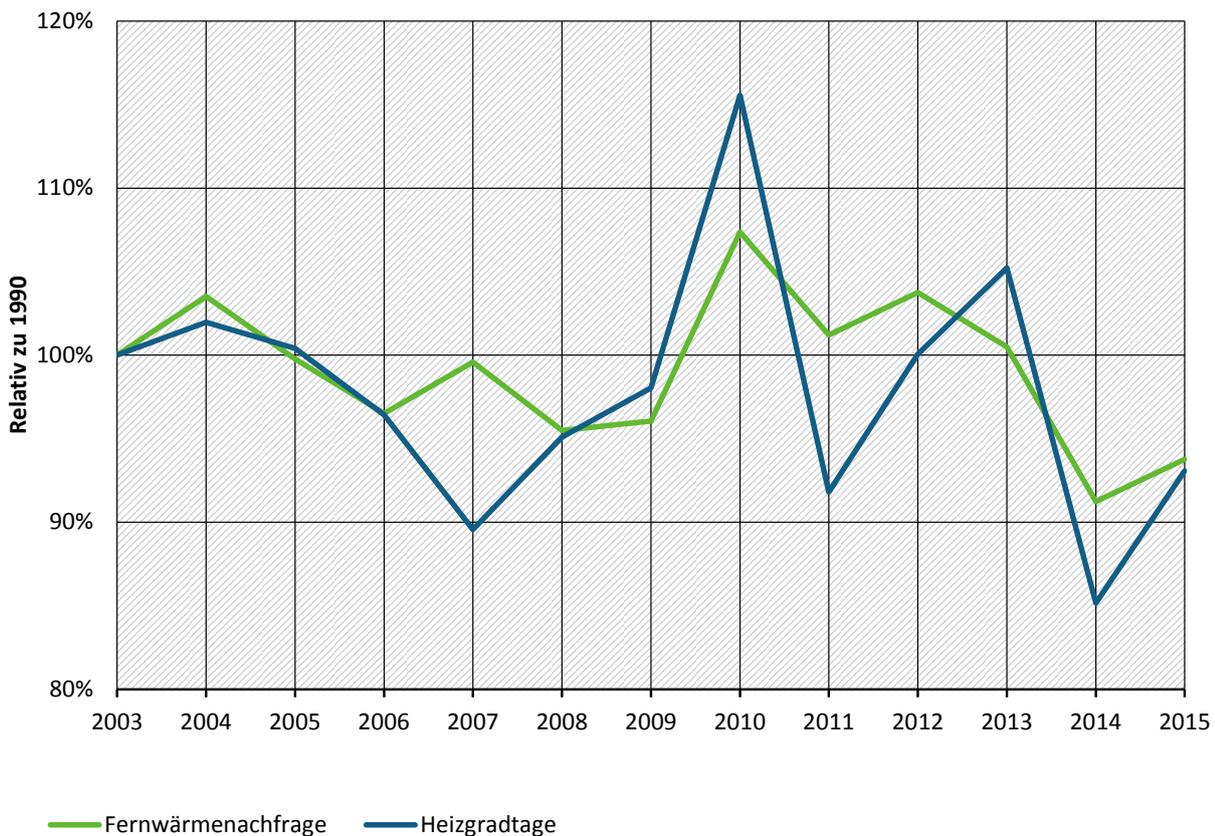
Abbildung 15: Komponentenzerlegung der jährlichen Entwicklung der CO₂-Emissionen der Fernwärme



Quelle: Eigene Berechnung

Die Fernwärmenachfrage ist sehr stark von der Witterung beeinflusst. Dies zeigt sich, dass in warmen Jahren die Fernwärmenachfrage deutlich emissionsenkend und in kalten Jahren deutlich emissionssteigernd wirkt. Besonders hervorzuheben sind hier das besonders warme Jahr 2014 und das besonders kalte Jahr 2010. Dies zeigt auch deutlich die Gegenüberstellung der Fernwärmenachfrage und der Witterung in Abbildung 16.

Abbildung 16: Fernwärmenachfrage im Vergleich zur Witterung seit 2003



Quelle: Eigene Berechnung

Fernwärme wird sowohl in Heizkraftwerken in Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) als auch ungekoppelt in reinen Heizwerken erzeugt. Im Jahr 2007 führte eine Verschiebung hin zu ungekoppelter und damit ineffizienterer Wärmeerzeugung zu deutlichen Mehremissionen. Für das Jahr 2008 bietet sich ein umgekehrtes Bild. Möglicherweise spielen hier auch Preiseffekte auf den in den Jahren 2007 und 2009 sehr dynamischen Energiemärkten eine Rolle, ob mehr oder weniger Fernwärme in Kraftwärmekopplung erzeugt wurde. Dies kann hier aber nicht weiter analysiert werden.

3.7 Personenstraßenverkehr

3.7.1 Identifikation der Treiber

Die Emissionen des Personenverkehrs werden von dem motorisierten Individualverkehr (MIV) dominiert. Dies liegt im Wesentlichen daran, dass ca. $\frac{3}{4}$ der in Deutschland zurückgelegten Personenkilometer dem PKW- und Motorradverkehr zugeordnet werden können (ifeu 2016). Hinzu kommt, dass der MIV einen relativ hohen Energieverbrauch im Vergleich zum öffentlichen Verkehr hat und die Emissionen der Stromerzeugung für den Bahnverkehr nach der Logik des Treibhausgasinventars dem Stromsektor zugeordnet werden. Der MIV emittierte 98 Mt CO₂ im Jahr 2015 und war damit für gut 13 % der energiebedingten CO₂-Emissionen verantwortlich. 1990 waren es noch 112 Mt CO₂.

Die Entwicklung der CO₂-Emissionen des motorisierten Individualverkehrs wird über die folgende Dekompositionsformel beschrieben:

$$CO_{2MIV} = Bev \cdot \frac{PKM_{ges}}{Bev} \cdot \frac{PKM_{Motor}}{PKM_{ges}} \cdot \frac{PKM_{MIV}}{PKM_{Motor}} \cdot \frac{EEV_{MIV}}{PKM_{MIV}} \cdot \frac{AbsatzMIV_{DE}}{EEV_{MIV}} \cdot \frac{AbsatzMIV_{DEfossil}}{AbsatzMIV_{DE}} \cdot \frac{CO_{2MIV}}{AbsatzMIV_{DEfossil}}$$

Die einzelnen Terme beschreiben dabei folgende Treiber:

Die **Bevölkerung (*Bev*)** als grundlegende Größe für die Verkehrsnachfrage

Die **Beförderungsintensität** ($\frac{PKM_{ges}}{Bev}$) drückt aus, welche Distanzen sich eine Person in einem Jahr in Deutschland fortbewegt.

Der **Anteil des nicht-motorisierten Individualverkehrs** ($\frac{PKM_{Motor}}{PKM_{ges}}$) zeigt, ob es eine Verschiebung zwischen nicht-motorisiertem Verkehr (zu Fuß, Fahrrad) und allen anderen Verkehrsträgern gibt.

Der **Anteil des öffentlichen Verkehrs** ($\frac{PKM_{MIV}}{PKM_{Motor}}$) stellt dar, welcher Anteil aller motorisierten Wege mit Bussen und Bahnen sowohl inner- als auch außerorts zurückgelegt werden.

Die **Effizienz des motorisierten Individualverkehrs** ($\frac{EEV_{MIV}}{PKM_{MIV}}$) ausgedrückt als Endenergieverbrauch pro Personenkilometer reflektiert sowohl die technische Verbesserung der Motoren als auch der Trend zu größeren und stärkeren Autos und Krafträdern sowie mögliche Änderungen in der Auslastung.

Das **Tankverhalten** ($\frac{AbsatzMIV_{DE}}{EEV_{MIV}}$) drückt aus, ob es wegen unterschiedlicher Kraftstoffpreise in Deutschland und den Nachbarstaaten zu Tanktourismus kommt. Der Treiber bildet auch zeitliche Differenzen zwischen Absatz und Verbrauch ab, wenn sie in unterschiedlichen Jahren stattfinden.

Der **Anteil von Biotreibstoffe & Strom** ($\frac{AbsatzMIV_{DEfossil}}{AbsatzMIV_{DE}}$) ist für die Betrachtung der CO₂-Emissionen des Sektors zentral. Emissionen aus der fossilen Stromerzeugung sowie den Vorketten der Produktion von Biotreibstoffen werden nicht dem Verkehrssektor zugeordnet.

Der **fossile Kraftstoffmix** ($\frac{CO_{2MIV}}{AbsatzMIV_{DEfossil}}$) hängt von den eingesetzten fossilen Treibstoffen ab. Im Verkehrssektor sind dies im wesentlichen Benzin und Diesel mit einem kleinen Anteil von Fahrzeugen, die mit LPG oder Erdgas betrieben werden.

Bei der Entwicklung der Dekompositionsformel wurde geprüft, auch einen Term zur Wirtschaftsentwicklung aufzunehmen. In Deutschland korreliert das Verkehrsverhalten im Personenverkehr im betrachteten Zeitraum aber nicht stark mit der Entwicklung des BIP, deshalb wurde dies wieder verworfen. Aufgrund von statistischen Brüchen und Inkonsistenzen kann die Dekomposition des Personenverkehrs erst ab 1994 durchgeführt werden.

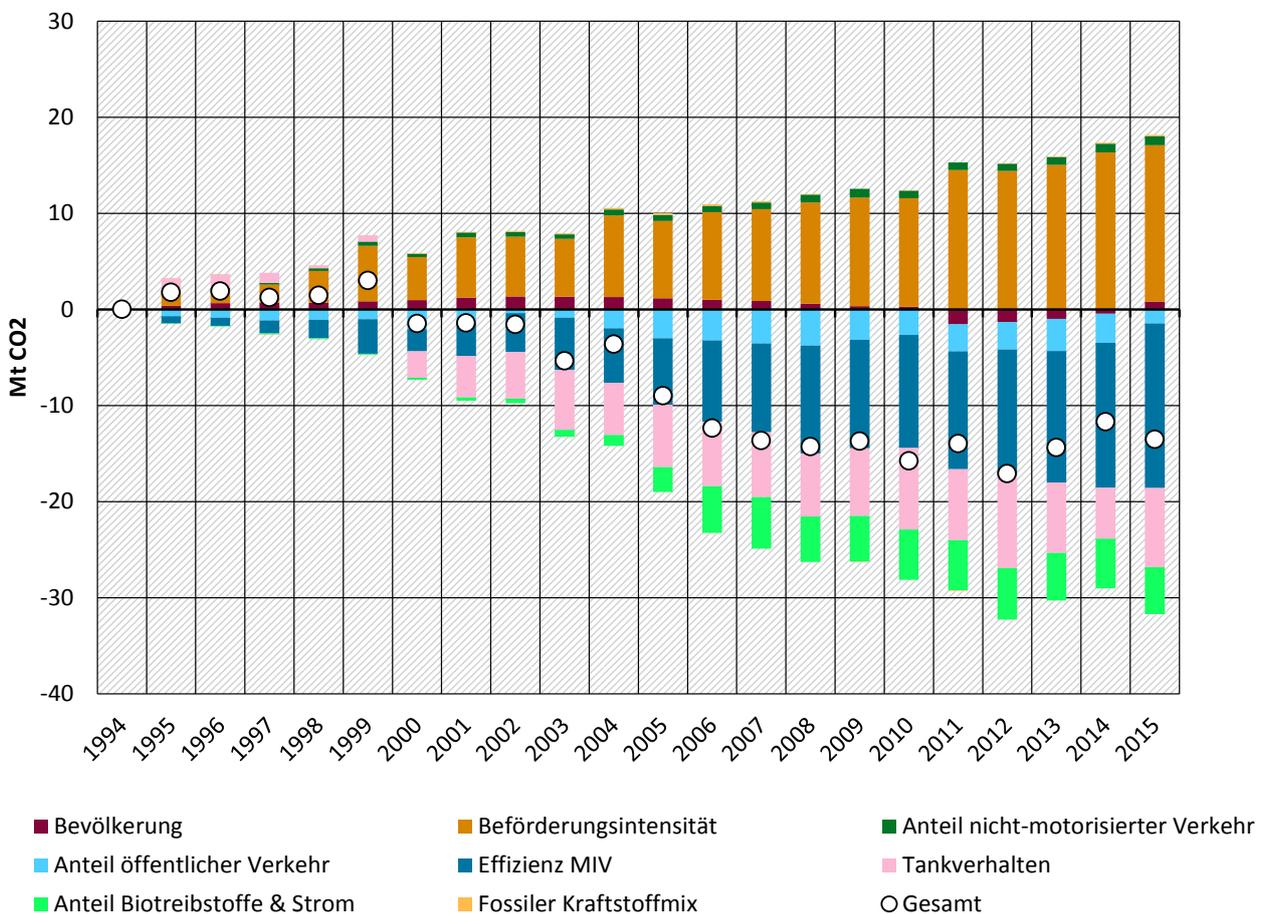
3.7.2 Ergebnisse

3.7.2.1 Analyse gegenüber 1994

Abbildung 17 zeigt den Einfluss der einzelnen Treiber zur Entwicklung der Emissionen des MIV. 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 mögliche Einsparung von Treibhausgasemissionen aufgrund von gesteigerter Energieeffizienz wird durch eine verstärkte Nachfrage zu

großen Teilen aufgehoben. Die Einführung der sogenannten Ökosteuer (Deutscher Bundestag 1999) kann an dem Tankverhalten gut nachvollzogen 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 in 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. 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.

Abbildung 17: Komponentenzerlegung der Entwicklung der CO₂-Emissionen des motorisierten Individualverkehrs seit 1994



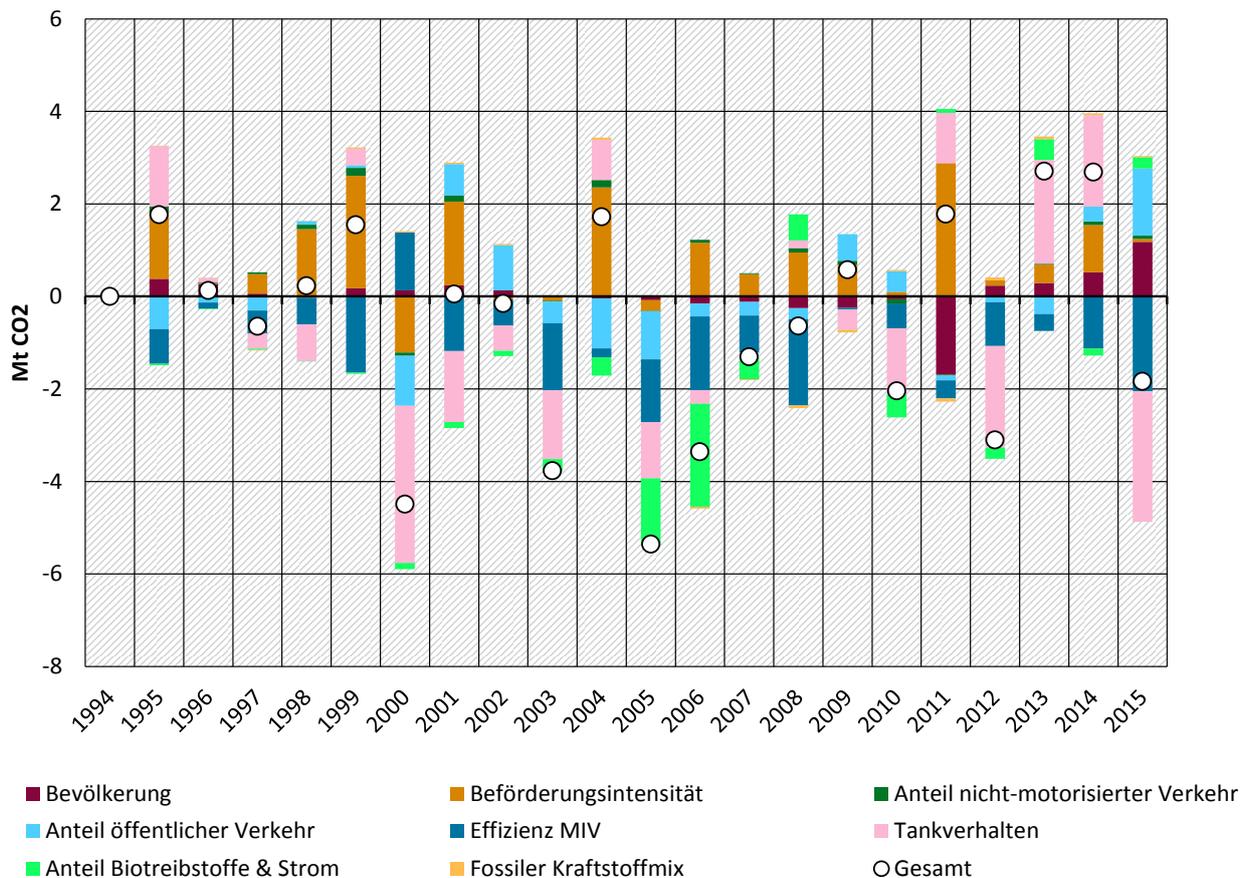
Quelle: Eigene Berechnung

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.

3.7.2.2 Jahr-auf-Jahr-Analyse

Statt gegenüber 1994 kann die Veränderung der CO₂-Emissionen auch von einem Jahr aufs nächste analysiert werden. Abbildung 18 zeigt den Einfluss aller Treiber im Personenverkehr jeweils für die Veränderung gegenüber dem Vorjahr. Hier fällt die Erhöhung der Mineralölsteuer im Rahmen der ökologischen Steuerreform besonders ins Auge: in den Jahren 1999-2003 wurde die Mineralölsteuer sowohl für Benzin als auch für Diesel jedes Jahr um 6 Pfennig je Liter erhöht und entsprechend kam es zu einem Tanktourismus aus Deutschland in die Nachbarstaaten. Seit 2004 gibt es keinen klaren Trend mehr, die jährlichen Schwankungen heben sich gegenseitig auf. Die Einführung von Biotreibstoffen hat im Wesentlichen in den Jahren 2005 und 2006 zu Emissionsminderungen geführt, seitdem kam es zu keinen wesentlichen Änderungen mehr. 2011 wirkt es so, als ob es eine deutliche Reduktion der Bevölkerung gegeben hätte. Dies ist ein statistisches Artefakt: mit dem Zensus 2011 wurde die Gesamtbevölkerung um 1,4 Millionen Menschen nach unten korrigiert, aber keine konsistente Zeitreihe für die Jahre davor rückgerechnet. Der Anstieg der Bevölkerung 2014 und 2015 ist dagegen zu großen Teilen auf den Zuzug von Flüchtlingen in den beiden Jahren zurückzuführen. Die Dekompositionsmethodik stößt hier an ihre Grenzen: Aufgrund ihrer ökonomischen Situation und den Aufenthaltsbeschränkungen werden die meisten der neuen Mitbürger eine deutlich niedrigere Mobilitätsnachfrage haben als die durchschnittliche Bevölkerung, d.h. der emissionssteigernde Effekt der gestiegenen Bevölkerung kommt zumindest kurzfristig in der Realität nicht so stark zu tragen wie hier berechnet.

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



Quelle: Eigene Berechnung

3.8 Straßengüterverkehr

3.8.1 Identifikation der Treiber

Die Emissionen des Güterverkehrs werden von dem Güterkraftverkehr, also dem Transport mit schweren und leichten LKW, dominiert. Dies liegt im Wesentlichen daran, dass ca. $\frac{3}{4}$ der in Deutschland zurückgelegten Tonnenkilometer dem LKW zugeordnet werden können (ifeu 2016). Hinzu kommt, dass der Straßengüterverkehr einen relativ hohen Energieverbrauch im Vergleich zum Transport per Bahn oder Binnenschiff hat. Außerdem werden die Emissionen der Stromerzeugung für den Bahnverkehr nach der Logik des Treibhausgasinventars dem Stromsektor zugeordnet. Der schwere Straßengüterverkehr emittierte 42,6 Mt CO₂ im Jahr 2015 und war damit für knapp 6 % der energiebedingten CO₂-Emissionen verantwortlich. 1990 waren es noch 30 Mt CO₂.

Die Entwicklung der CO₂-Emissionen des Straßengüterverkehrs wird über die folgende Dekompositionsformel beschrieben:

$$CO_{2Lkw} = BIP \cdot \frac{TKM_{ges}}{BIP} \cdot \frac{TKM_{Lkw}}{TKM_{ges}} \cdot \frac{EEV_{Lkw}}{TKM_{Lkw}} \cdot \frac{AbsatzLKW_{DE}}{EEV_{Lkw}} \cdot \frac{AbsatzLKW_{fossil}}{AbsatzLKW_{DE}} \cdot \frac{CO_{2Lkw}}{AbsatzLKW_{fossil}}$$

Die einzelnen Terme beschreiben dabei folgende Treiber:

Die **Wirtschaftsentwicklung (BIP)** als grundlegende Größe für die Transportnachfrage

Die **Transportintensität** ($\frac{TKM_{ges}}{BIP}$) drückt aus, wie stark die Nachfrage nach Transportdienstleistungen mit der Wirtschaftsentwicklung korreliert.

Der **Anteil des Straßengüterverkehrs** ($\frac{TKM_{Lkw}}{TKM_{ges}}$) deckt die Wahl der Verkehrsträgers ab (Modal Split). Er drückt aus, welcher Teil des gesamten Güterverkehrs von LKW und nicht von Bahn, Schiff oder Flugzeug geleistet wird.

Die **Effizienz** ($\frac{EEV_{Lkw}}{TKM_{Lkw}}$) der Fahrzeuge reflektiert sowohl die technische Verbesserung der Motoren als auch Änderungen bei den Typen der Fahrzeuge und der Logistik. So steigert z.B. eine bessere Auslastung der LKW und eine Reduktion der Leerfahrten die Energieeffizienz pro transportierte Tonne.

Das **Tankverhalten** ($\frac{AbsatzLKW_{DE}}{EEV_{Lkw}}$) drückt aus, ob es wegen unterschiedlicher Kraftstoffpreise in Deutschland und den Nachbarstaaten zu strategischem Tanken kommt.

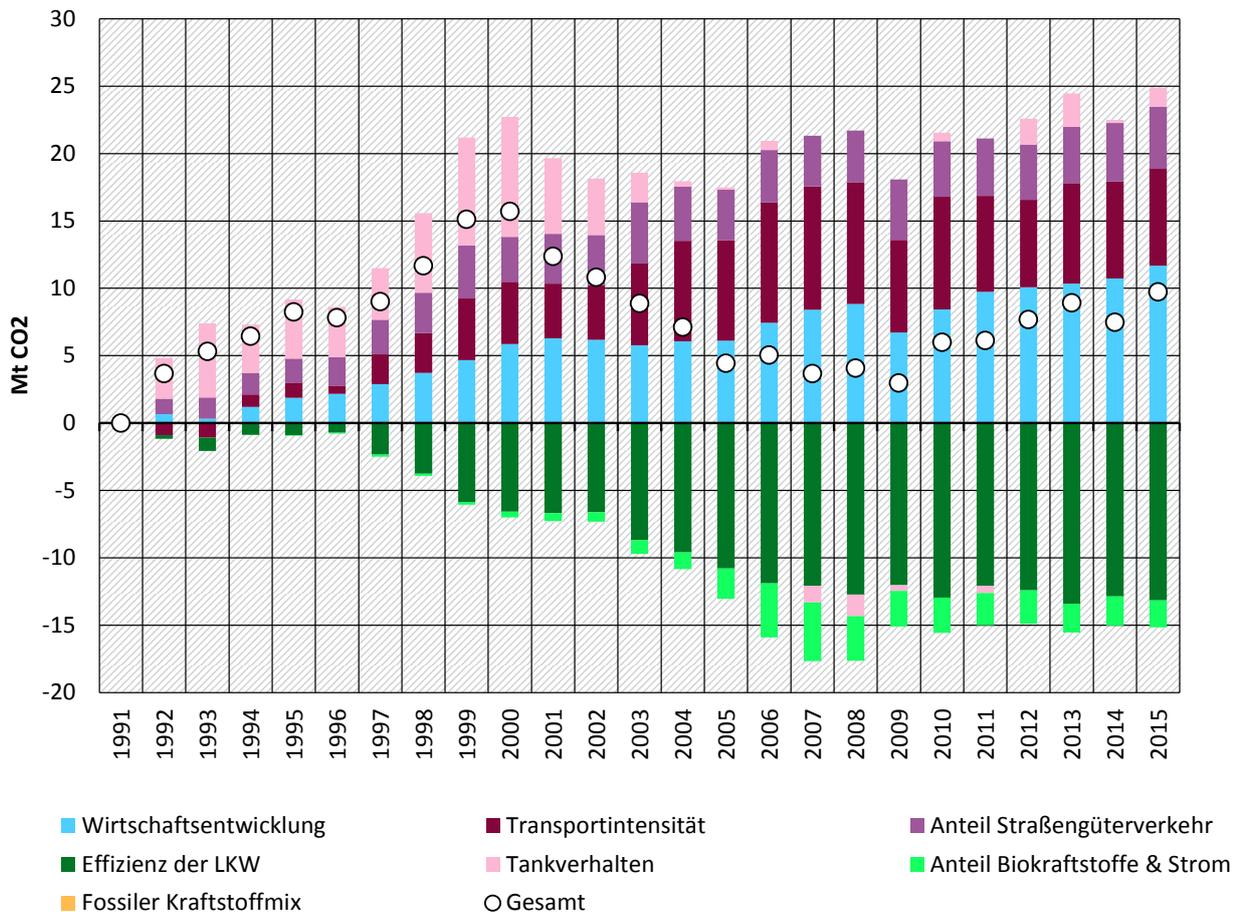
Der **Anteil von Biokraftstoffen und Strom** ($\frac{AbsatzLKW_{fossil}}{AbsatzLKW_{DE}}$) ist für die Betrachtung der CO₂-Emissionen des Sektors zentral, wobei aktuell nur sehr wenige stromgetriebene LKW im Markt sind. Emissionen aus der fossilen Stromerzeugung sowie den Vorketten der Produktion von Biotreibstoffen werden nicht dem Verkehrssektor zugeordnet.

Der **fossile Kraftstoffmix** ($\frac{CO_{2Lkw}}{AbsatzLKW_{fossil}}$) hängt von den eingesetzten fossilen Treibstoffen ab. Im Straßengüterverkehr wird im wesentlichen Diesel und teilweise Benzin für kleine Nutzfahrzeuge verwendet. LPG oder Erdgas können auch in kleinen Anteilen vorkommen. Die Dekompositionsanalyse ist erst ab 1991 möglich. Durch die Zusammenführung der Statistiken Ost- und Westdeutschlands für das Jahr der Wiedervereinigung gibt es sowohl für die Wirtschaftsleistung als auch die Transportnachfrage keine konsistenten Zahlen für 1990. Da für den Lieferverkehr in Städten mit kleinen LKW keine Transportaktivitätsdaten vorliegen, wird im Folgenden nur der schwere LKW-Verkehr betrachtet.

3.8.2 Ergebnisse

3.8.2.1 Analyse gegenüber 1991

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 Ökosteuer und Verteuerung des Diesels zwischen 1999 und 2003 zeigt sich klar im Tankverhalten: in den 1990iger 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).

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

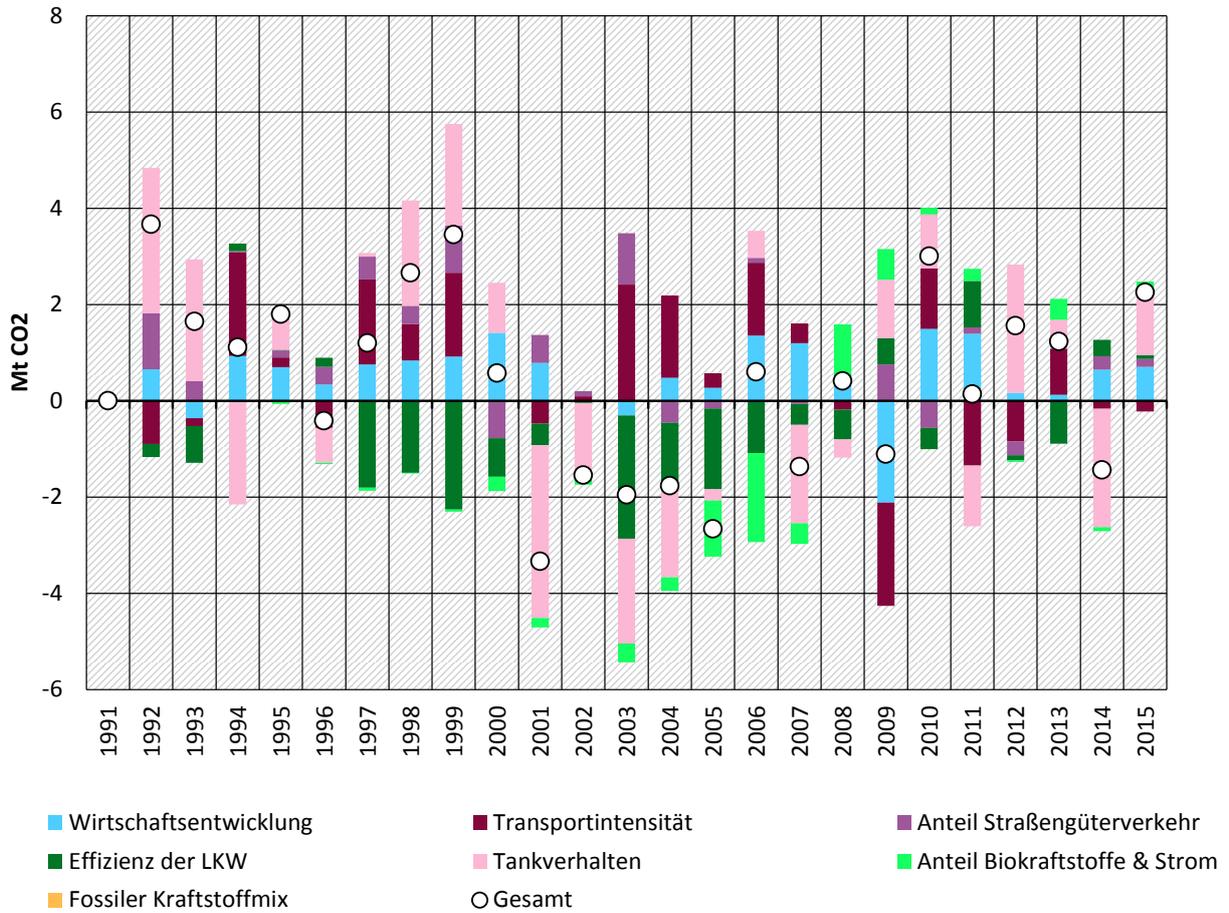
Quelle: Eigene Berechnung

3.8.2.2 Jahr-auf-Jahr-Analyse

Statt gegenüber 1991 kann die Veränderung der CO₂-Emissionen auch von einem Jahr aufs nächste analysiert werden. Abbildung 20 zeigt den Einfluss aller Treiber im Güterkraftverkehr jeweils für die Veränderung gegenüber dem Vorjahr. Hier fällt die Erhöhung der Mineralölsteuer im Rahmen der ökologischen Steuerreform besonders ins Auge: in den Jahren 1999-2003 wurde die Mineralölsteuer sowohl für Benzin als auch für Diesel jedes Jahr um 6 Pfennig je Liter erhöht und damit der Kraftstoff im Vergleich zu den Nachbarstaaten verteuert. Auch die Einführung von Biodiesel ab 2003 über Steuererleichterungen und später über eine Beimischquote ist klar zu sehen. Die globale Wirtschaftskrise in 2009 hat in Deutschland sowohl die Wirtschaftskraft als auch die Transportintensität sinken lassen. Während die Wirtschaftsleistung in den Jahren danach wieder deutlich gestiegen ist, schwankt seitdem die Transportintensität ohne einen klaren Trend zu zeigen. Auch beim Tankverhalten ist seit ein paar Jahren keine klare Tendenz erkennbar.

Einzelne Entwicklungen haben statistische Gründe: So ist der Anstieg der Transportintensität von 2002 auf 2003 zum Teil auf eine Änderung der Güterverkehrsstatistik zurückzuführen. Da dies real keinen Einfluss auf die Entwicklung der CO₂-Emissionen hat, wird dies in der Dekompositionanalyse rechnerisch kompensiert durch eine Effizienzverbesserung (Energie je Tonnenkilometer).

Abbildung 20: Komponentenzerlegung der jährlichen Entwicklung der CO₂-Emissionen des Straßengüterverkehrs seit 1991



Quelle: Eigene Berechnung

4 Quellenverzeichnis

- Albrecht, J.; Fran, D. & Schoors, K. (2002). A Shapley decomposition of carbon emissions without residuals. *Energy Policy* 30, S. 727–736.
- Ang, B. W. (2000). A survey of index decomposition analysis in energy and environmental studies. *Energy* 25 (12), S. 1149–1176. Verfügbar unter <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544200000396>.
- Ang, B. W. (2004). Decomposition analysis for policymaking in energy. *Energy Policy* 32 (9), S. 1131–1139.
- Ang, B. W. (2005). The LMDI approach to decomposition analysis: a practical guide. *Energy Policy* 33 (7), S. 867–871.
- Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB) (2015): Vorwort zu den Energiebilanzen für die Bundesrepublik Deutschland (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB), Hrsg.). Verfügbar unter www.ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=vorwort.pdf.
- Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB) (2016a): Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland in den Jahren 2013 bis 2015 (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB), Hrsg.), Berlin. Verfügbar unter http://www.ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=ageb_bericht_anwendungsbilanzen_2013-2015_hjz_2016-11-29.pdf.
- Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB) (2016b): 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) (2016c): 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) (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).
- 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.
- DIW Berlin & Energy Environment Forecast Analysis (EEFA) (2009): Dokumentation zur Revision der Energiebilanzen für die Bundesrepublik Deutschland für die Jahre 2003 bis 2006, Berlin.
- 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.

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.

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 (2000): Emission Scenarios: Cambridge University Press. Verfügbar unter <http://www.ipcc.ch/ipccreports/sres/emission/index.php?idp=50>.

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.

Öko-Institut e.V. & Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (ifeu) (2017): Komponentenzerlegung energiebedingter Treibhausgasemissionen mit Fokus auf dem Ausbau erneuerbarer Energien. Visualisierung der Unterschiede & Gemeinsamkeiten der verschiedenen Emissionsberichterstattungspflichten. Erster Zwischenbericht zu AP 1 (Umweltbundesamt (UBA), Hrsg.), Dessau-Roßlau.

Seibel, S. (2003): Decomposition analysis of carbon dioxide-emission changes in Germany. Conceptual framework and empirical results. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities. Verfügbar unter https://www.destatis.de/EN/Publications/Specialized/EnvironmentalEconomicAccounting/Decomposition.pdf?__blob=publicationFile.

Statistisches Bundesamt (StBA) (2017): Bevölkerung: Deutschland, Stichtag. Statistik 12411, Fortschreibung des Bevölkerungsstandes, Wiesbaden, zuletzt abgerufen am 12.09.2017.

Sun (1998). Changes in energy consumption and energy intensity : A complete decomposition model. *Energy Economics* 20, S. 85–100.

Umweltbundesamt (UBA) (2014): Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger. Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2013 (Nr. 29), Dessau-Roßlau. Verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate_change_29_2014_schrempf_komplett_10.11.2014_0.pdf, zuletzt abgerufen am 16.03.2017.

Umweltbundesamt (UBA) (2016a): Aktualisierung der Eingangsdaten und Emissionsbilanzen wesentlicher biogener Energienutzungspfade (BioEm) (Umweltbundesamt (UBA), Hrsg.) (Texte 09/2016). Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (UBA). Verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/aktualisierung-der-eingangsdaten-emissionsbilanzen>.

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.