

Stephan Buhofer

**Der Klimawandel und die
internationale Klimapolitik
in Zahlen
Eine Übersicht**



2., überarbeitete Auflage

 **oekom**

Stephan Buhofer
Der Klimawandel und die internationale Klimapolitik in Zahlen

Eine Übersicht

ISBN 978-3-96238-097-7

154 Seiten, 14,8 x 21cm, 25,- Euro
oekom verlag, München 2018

©oekom verlag 2018

www.oekom.de

4 Das 2-Grad-Celsius-Ziel

Das Ziel, den globalen Temperaturanstieg auf unter 2 Grad Celsius seit der Industrialisierung²⁸⁵ zu begrenzen, um die schlimmsten Folgen des Klimawandels abzuwenden, wurde vereinzelt seit Ende der 1970er-Jahre diskutiert und ist auf der politischen Ebene erstmals 1996 durch die Regierungen der Europäischen Union (Europäischer Rat) als Orientierungspunkt formuliert worden.²⁸⁶ An der UNFCCC-Klimakonferenz in Kopenhagen im Jahre 2009 folgte die gesamte Staatengemeinschaft mit einer politischen Absichtserklärung, in welcher sie sich unverbindlich zum Ziel setzte, den globalen Temperaturanstieg auf unter 2 °C zu begrenzen.²⁸⁷ Der Wert basiert auf wissenschaftlichen Erkenntnissen, wonach die Wahrscheinlichkeit von drastischen Konsequenzen für Mensch und Natur mit einer Temperaturerhöhung von über 2 °C deutlich zunimmt.²⁸⁸

Wie oben (Kapitel 1.9) erläutert, schätzt das IPCC die Temperaturerhöhung bei einer Verdoppelung des Kohlendioxids seit 1750 von 280 ppm auf 560 ppm mit langfristig zwischen 1,5 °C und 4,5 °C und einem Mittelwert von 3 °C ein. Abgeleitet davon hat sich die Zahl von 450 ppm CO₂eq als Grenzwert durchgesetzt, bei welchem die Konzentration der Treibhausgase bei anschließender Stabilisierung auf diesem Niveau eine Erwärmung von 2 °C verursacht.²⁸⁹ Man

285 Durch die EU Climate Change Expert Group definiert als die durchschnittliche globale Oberflächentemperatur 1850–1899. EU Climate Change Expert Group (2008), S. 8, Fußnote 2. Im Abkommen von Paris wird der vorindustrielle Zeitraum nicht definiert. Schurer et al. (2017), S. 563.

286 IPCC, AR5 WGI, 12.5.4.1 (S. 1107); EU Climate Change Expert Group (2008), S. 8; Jaeger, Jaeger (2011), S. 18; Randalls (2010), S. 599 ff. Ökonom William Nordhaus gilt als erster Autor, welcher eine Erwärmung von 2 °C als eine Grenze darstellte. Schon 1977 schrieb er, dass ein Anstieg der Temperatur von über 2 °C eine klimatologische Außergewöhnlichkeit darstellen würde. »If there were global temperatures more than 2 or 3 °C above the current average temperature, this would take the climate outside of the range of observations which have been made over the last several hundred thousand years.« Nordhaus (1977), S. 39–40, siehe auch Grafik S. 3 und S. 59; Randalls (2010), S. 599; Jaeger, Jaeger (2011), S. 16.

287 Copenhagen Accord, UNFCCC Decision 2/CP.15, FCCC/CP/2009/11/Add.1, para. 1–2. Siehe auch z. B. UNFCCC Decision 1/CP.16, FCCC/CP/2010/7/Add.1, para. 4; Jaeger, Jaeger (2011), S. 15–16.

288 EU Climate Change Expert Group (2008), S. 8–9. Der Wert wird in der Wissenschaft aber auch dafür kritisiert, eine sichere Grenze zu suggerieren, welche nicht existiert. Siehe z. B. Knutti et al. (2016), S. 13.

289 EU Climate Change Expert Group (2008), S. 4, Fig 3.2 (S. 28); IPCC, AR5 WGIII, Table SPM 1 (S. 13) (ähnlich IPCC, AR5 Synthesis Report, Table SPM 1 (S. 22)). Dabei wird die Wahrscheinlichkeit des Erreichens einer Temperatur von 2 °C im Falle einer Konzentration von 450 ppm CO₂eq im Jahr 2100 vom IPCC als »likely« eingestuft, was 66–100 % entspricht. IPCC, AR5 WGIII, Summary for Policymakers, Fußnote 2 (S. 4). In IPCC, AR5 WGIII, Table SPM 1 (S. 13) wurde die erwartete Erwärmung im Jahr 2100 als Maßstab genommen und somit die *transient climate response*, nicht die Gleichgewichts-Klimasensitivität (siehe oben, Kapitel 1.9) berechnet. IPCC, AR5 WGIII, Table SPM 1 Fußnote 6 (S. 13). In IPCC, AR4 WGIII, wurde für 2 °C im Gleichgewicht die etwas tiefere Zahl von

beachte dabei, dass eine Stabilisierung der Konzentration aufgrund der Verweilzeit der Gase eine Reduktion der Emissionen voraussetzt (siehe Abb. 4.1). Wie oben gesehen (Kapitel 1.7), wurde 2011 eine Konzentration von 430 ppm CO₂eq erreicht, was einer Erwärmung (bei gleichbleibender Konzentration und im Gleichgewicht) von 1,9 °C entspricht.²⁹⁰ Diese Zahlen enthalten alle Treibhausgase sowie die Wirkung der Aerosole.²⁹¹ Doch Aerosole haben eine kürzere Verweilzeit als die hauptsächlichen Treibhausgase und werden voraussichtlich in der Zukunft aufgrund strengerer Luftreinhaltevorschriften reduziert werden. Entsprechend würde dann die kühlende Wirkung wegfallen und der Kohlendioxid-Äquivalente-Wert würde sich schneller erhöhen.²⁹² Ohne Einbezug der Aerosole wäre der Wert von 450 ppm CO₂eq schon um das Jahr 2005 erreicht worden²⁹³ und 2014 stand er bei 481 ppm CO₂eq²⁹⁴. Die **jährliche Zuwachsrate** der Konzentration der Treibhausgase betrug in den letzten Jahren jeweils zwischen 2 und 4 ppm CO₂eq.²⁹⁵

Bei der Benutzung des Maßes der Kohlendioxid-Äquivalente der Konzentration zur Einschätzung des Verhältnisses zum 2-Grad-Celsius-Ziel müssen jedoch zwei Einschränkungen gemacht werden: Erstens verhält sich die Konzentration der Treibhausgase nicht proportional zur Temperatur, sondern nimmt in der Wirkung ab.²⁹⁶ Dies bedeutet, dass die Wirkung auf die Temperatur der zukünftigen Entwicklung der Konzentration nicht direkt mit dem bisher Erreichten verglichen werden kann. Der Strahlungsantrieb, welcher durch eine Zunahme in der Konzentration der Treibhausgase verursacht wird, verringert sich stetig. Allerdings ändert das nichts an der Wirkung der 450 ppm CO₂eq

441 ppm CO₂eq kalkuliert, bei einer Gleichgewichts-Klimasensitivität von 3 °C. IPCC, AR4 WGIII, Table 3.9 (S. 227) und Fußnote 1 zur Grafik. Der Grenzwert kann in Anwendung der oben in Anmerkung 194 wiedergegebenen Formel $\Delta T = \lambda \ln(\text{CO}_2/\text{CO}_{2(t=1750)})/\ln 2$ berechnet werden: $2 = \lambda \ln(x/280)/\ln 2$, $x = 280 \cdot 22/3 = 445$.

290 Siehe oben, Text bei Anmerkung 194.

291 IPCC, AR5 WGI, Table SPM 1 Fußnote 9 (S. 13). Es gilt also nicht der für Kohlendioxid allein erreichte Wert. 2005 entsprachen der CO₂- und CO₂eq-Wert per Zufall ungefähr einander. Siehe IPCC, AR4 Synthesis Report, Table 5.1, Fußnote b (S. 67). Siehe auch EU Climate Change Expert Group (2008), S. 29. Da die Aerosol-Konzentration jedoch in letzter Zeit konstant ist, während die Emission der Treibhausgase zunimmt, steigt der CO₂eq-Wert im Vergleich zum CO₂-Wert stärker an.

292 Siehe z. B. EU Climate Change Expert Group (2008), S. 29.

293 IPCC, AR4 Synthesis Report, Table 5.1, Fußnote b (S. 229); EU Climate Change Expert Group (2008), S. 29.

294 U. S. Department of Commerce / National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA), Earth System Research Laboratory, Global Monitoring Division, The NOAA Annual Greenhouse Gas Index (AGGI), Table 2. (<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/aggi.html>).

295 Siehe Quelle in Anmerkung 294.

296 Siehe oben, Text bei Anmerkung 121 und 180.

und der Beobachtung, wie rasch dieser Wert erreicht wird. Zweitens geht diese Betrachtungsweise von einer konstanten Konzentration der einmal erreichten 450 ppm CO₂eq aus, während die Situation durch sich ändernde Emissionen sowie durch den Abbau von Treibhausgasen beeinflusst wird. Wie erläutert²⁹⁷ würde beispielsweise ein sofortiger Stopp aller Emissionen bei Erreichen einer Konzentration von 450 ppm CO₂eq nicht zu einer langfristigen Temperatur von 2°C führen, sondern ungefähr zu der zu diesem Zeitpunkt erreichten Temperatur.

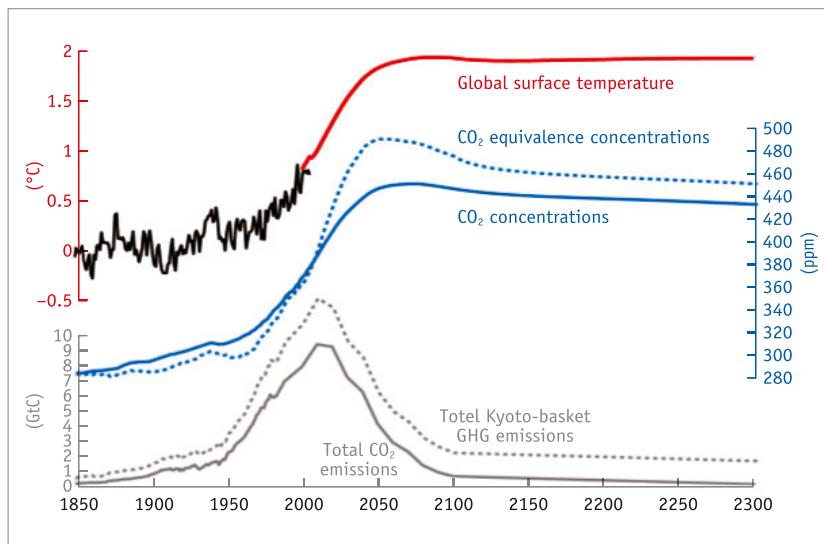


Abb. 4.1 Szenarium zur Erreichung des 2-Grad-Celsius-Ziels. Die Grafik illustriert den Zusammenhang zwischen der Emission von Treibhausgasen (grau: Kohlendioxid; grau gestrichelt: alle Treibhausgase unter dem Kyoto-Protokoll), deren Konzentration in der Atmosphäre (blau: Kohlendioxid; blau gestrichelt: Kohlendioxid-Äquivalente) und der Temperatur (schwarz: historisch; rot: Berechnung). Die Emissionen basieren auf der Annahme von in der Zukunft weiter ansteigenden und dann rückgängigen Werten, welche keine Prognose, sondern eine mögliche Entwicklung aufzeigt. Für ähnliche Analysen siehe z. B. IPCC, AR5 WGI, Figure 12.44 (S. 1104) und Latif, (2009), Abb. 5 (S. 16). Quelle Grafik: EU Climate Change Expert Group, Fig. 3.3 (S. 30). Für eine Beschreibung der Grundlagen und getroffenen Annahmen siehe EU Climate Change Expert Group, Appendix 2 (S. 54–55).

297 Siehe oben, Text bei Anmerkung 219.

Der Zusammenhang zwischen dem Bewirken einer bestimmten Temperatur, der Konzentration und den Emissionen von Treibhausgasen ist also komplex, und die erreichte Konzentration eignet sich nicht besonders gut für eine Standortbestimmung hinsichtlich der Auswirkung auf die Temperatur. Eine alternative Methode, das Verhältnis zum 2-Grad-Celsius-Ziel zu berechnen, basiert auf der Festsetzung eines **Emissions-Budgets**, dessen Ausschöpfung das Erreichen der Temperatur von 2 °C markiert. Diese Vorgehensweise, welche direkt von den Emissionen ausgeht, beruht auf der Anwendung der *transient climate response to cumulative carbon emissions* (TCRE), welche die durchschnittliche globale Änderung der Oberflächentemperatur pro Einheit angesammelter Kohlendioxidemissionen misst (siehe oben, Kapitel 1.9). Das IPCC schätzt, dass zur Begrenzung der Erwärmung auf 2 °C die CO₂-Emissionen einen Wert von maximal rund 1000 PgC bzw. 3 670 GtCO₂ nicht überschreiten sollten, wenn eine Wahrscheinlichkeit von über 66 % zur Erreichung des Ziels bestehen soll.²⁹⁸ Erreicht wurden bis 2011 rund 515 PgC oder 1890 GtCO₂²⁹⁹, also etwas über die Hälfte.

Diese Zahl berücksichtigt nur Kohlendioxidemissionen. Aufgrund ihrer verglichen zum Kohlendioxid meist kurzen Verweilzeit sammeln sich andere Gase und die Aerosole jedoch nicht über längere Zeiträume in der Atmosphäre an, und deren Wegfall hätte eine schnelle Reaktion der Temperatur zur Folge.³⁰⁰ Werden die weiteren den Strahlungsantrieb beeinflussenden anthropogenen Faktoren³⁰¹ dennoch berücksichtigt (also geht man davon aus, dass diese bestehen bleiben), reduziert sich das Budget auf 790 PgC bzw. 2 900 GtCO₂.³⁰² Zwei Drittel davon sind aufgebraucht. Bei der Fortführung der Emissionen auf dem

298 IPCC, AR5 WGI, 10.8.4 (S. 927), 12.5.4.3 (S. 1113). Siehe für die Umrechnung von PgC in CO₂ oben, Anmerkung 225. IPCC, AR5 WGIII, Table 6.3 (S. 431), enthält ähnliche, aber nicht identische Zahlen. Siehe dazu United Nations Environment Programme, The Emissions Gap Report 2014, S. 9.

299 IPCC, AR5 WGI, 12.5.4.3 (S. 1113). Der Wert wurde mit Ausgangspunkt im Jahr 1870 erreicht, was den größten Teil der Emissionen seit der Industrialisierung beinhaltet. Die Zahl basiert auf Schätzungen und weicht etwas von dem in Kapitel 3.2 mit einem anderen Zeithorizont wiedergegeben Wert ab.

300 United Nations Environment Programme, The Emissions Gap Report 2015, Box 2.1 (S. 6); IPCC, AR5 WGI, Figure 12.44 (c), FAQ 12.3 (S. 1106–1107); Knutti, Rogelj (2015), S. 363.

301 Nicht-Kohlendioxid-Einflüsse basieren auf den *Representative Concentration Pathways* (RCPs), welche alle Treibhausgase und Aerosole beinhalten. Siehe IPCC, AR5 WGI, Box SPM.1 (S. 29), 12.2.2 (S. 1038–1039), Glossary »Representative Concentration Pathways« (RCPs) (S. 1461). Zukünftige Landnutzungsänderungen sind nicht in der Zahl enthalten. IPCC, AR5 WGI, 12.5.4.3 (S. 1113).

302 IPCC, AR5 WGI, 12.5.4.3 (S. 1113); Knutti, Rogelj (2015), S. 364, 365. Siehe für die Zahlen auch United Nations Environment Programme, The Emissions Gap Report 2014, S. 9.

Niveau von 2014 (also konstanten und nicht weiter ansteigenden Emissionen) würde die Grenze innerhalb von rund 30 Jahren erreicht sein.³⁰³

Eine weitere Methode, das 2-Grad-Celsius-Ziel mit den gegenwärtigen Emissionen zu vergleichen, sind sog. **Emissionspfade** (*emission pathways*). Dies sind mögliche Szenarien zukünftiger Emissionen unter gewissen Annahmen, wobei mittels Modellen mögliche Entwicklungen der Emissionen berechnet werden, in welchen die Temperatur unter 2 °C bleibt. Das Umweltprogramm der Vereinten Nationen (United Nations Environment Programme (UNEP)) veröffentlicht jährlich eine Analyse solcher Vorhersagen. Gemäß der Einschätzung von UNEP müssten, um eine Wahrscheinlichkeit von über 66 % einer Begrenzung des Temperaturanstiegs auf 2 °C im Jahr 2100 zu erhalten, die jährlichen Emissionen von 54 GtCO₂eq im Jahre 2012 auf 52 GtCO₂eq im Jahre 2020 zurückgehen,³⁰⁴ auf 42 GtCO₂eq bis ins Jahr 2030, auf 23 GtCO₂eq bis ins Jahr 2050 und im Jahr 2100 auf –3 GtCO₂eq.³⁰⁵

303 Friedlingstein et al. (2014), S. 709, Table 1 (S. 710), S. 712 (basierend auf CO₂-Emissionen von 37 GtCO₂ im Jahr 2014 und auf einem Budget (welches Nicht-Kohlendioxid-Emissionen berücksichtigt) von 3 200 GtCO₂, nicht 2 900 GtCO₂, da von einer Wahrscheinlichkeit von genau 66 % ausgegangen wird); Knutti, Rogelj (2015), S. 364.

304 Dies ungefähr im Einklang mit den freiwilligen Zielvorgaben, welche sich die Mitgliedsstaaten des UNFCCC 2010 in Cancun für 2020 vorgegeben haben. United Nations Environment Programme, The Emissions Gap Report 2015, 2.2.2 (S. 5).

305 United Nations Environment Programme, The Emissions Gap Report 2015, Table 2.1 (S. 6). Vgl. die etwas tieferen Werte in IPCC, AR5 WGI, 12.5.4.3 (S. 1113). Siehe auch die Diskussion in IPCC, AR5 WGI, TFE.8 (S. 102–105).

54 GtCO₂eq

5 Emissionen und deren Quellen

5.1 Emissionen von Treibhausgasen

Das Maß für Emissionen sind Gewichtseinheiten. Jährliche Emissionen werden normalerweise in Gigatonnen (Gt) (Milliarden Tonnen, 10^9 , *gigatons*) oder Megatonnen (Mt) (Millionen Tonnen, 10^6 , *megatons*)³⁰⁶ wiedergegeben. Anders als die Konzentration werden Emissionen nicht direkt gemessen, sondern anhand von Daten über Treibhausgasemissionen verursachende Aktivitäten, z. B. den Ölverbrauch, berechnet. Schätzungen der Emissionszahlen für alle Treibhausgase existieren in umfassender und konsistent berechneter Weise seit 1970.³⁰⁷

Die Emissionen³⁰⁸ aller Treibhausgase betragen im Jahr 2012 weltweit rund 54 GtCO₂eq.³⁰⁹ Die Zunahme schwankt von Jahr zu Jahr. Zwischen 2000

³⁰⁶ Emissionen werden in metrischen Tonnen (USA: *metric ton*, England: *tonne*), welche 1000 kg entsprechen, gemessen. Diese sind zu unterscheiden von der *long ton* und der *short ton* bzw. *ton*, welche in England und den USA gebräuchlich sind, auf der Gewichtseinheit der *pounds* basieren und im Gewicht von der metrischen Tonne abweichen. Manchmal werden die Emissionen auch in Form von Kohlenstoff (C) wiedergegeben. Multipliziert mit dem Faktor 3,667 ergibt der Kohlenstoffwert den Kohlendioxidwert.

³⁰⁷ IPCC, AR5 WGIII, 5.2.1 (S. 358).

³⁰⁸ China hat seine Angaben zum Kohleverbrauch Ende 2015 korrigiert. Die Schätzungen der zusätzlichen Emissionen für die Vergangenheit gehen auseinander und betreffen vor allem die Zeit seit 2005. Die International Energy Agency beziffert die Differenz für 2011 und 2012 auf zwischen 4 % bis 6 %, andere Kalkulationen liegen höher. Siehe New York Times, *China is Burning Much More Coal Than It Claimed*, Nov. 4, 2015, S. A1. Diese Korrektur ist in den hier enthaltenen Zahlen nicht berücksichtigt.

³⁰⁹ European Commission, Joint Research Centre (JRC)/PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR), GHG (CO₂, CH₄, N₂O, F-Gases) emission time series 1990–2012 per region/country (<http://edgar.jrc.ec.europa.eu>, Emissions Data and Maps, Greenhouse Gases, previous releases). EDGAR bezieht die Aufnahme von Kohlendioxid durch die Biomasse (Senkenleistung, siehe näher unten, Kapitel 5.4) nicht ein (EDGAR website: <http://edgar.jrc.ec.europa.eu>, Overview, Results, Kyoto Protocol Greenhouse Gases; sowie Kommunikation des Autors mit EDGAR Team) und auch keine Treibhausgase, welche dem Montreal-Protokoll unterliegen und die Ozonschicht schädigen (siehe die Beschreibung in eingangs erwähnter EDGAR website, welche die Daten enthält). Weitere gängige Quellen für Emissionszahlen: Treibhausgase allgemein: United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (erhob Treibhausgasemissionen im hier behandelten Zeitraum auf regelmäßiger Basis nur für die Industriestaaten) (<http://unfccc.int>); International Energy Agency (IEA), CO₂ Emissions from Fuel Combustion, Part III (Part III basiert auf EDGAR-Zahlen) (<http://www.iea.org>); World Resources Institute (WRI), Climate Analysis Indicators Tool (CAIT) (<http://cait.wri.org>, Historical Emissions); U. S. Department of Commerce, National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA), Earth System Research Laboratory (ESRL), Global Monitoring Division (GMD), The NOAA Annual Greenhouse Gas Index (AGGI), Table 2 (Strahlungsantrieb, Zahlen ohne Aerosole (brutto) und inklusive halogenierte Gase, welche unter das Montreal-Protokoll fallen) (<http://www.esrl.noaa.gov/gmd>, Data and Products, Greenhouse Gas Index, AGGI Details and Data); PBL Netherlands Environmental Assessment

und 2010 erhöhten sich die Emissionen jährlich um etwa 1GtCO₂eq.³¹⁰ also durchschnittlich ungefähr 2 %. In den Jahren 2014 bis 2016 verlief der Anstieg flacher und lag bei 0,5 % oder darunter, was vor allem mit einem Rückgang der Kohlenutzung und dem vermehrten Einsatz erneuerbarer Energien zusammenhängt.³¹¹

1970 betragen die jährlichen Treibhausgasemissionen noch 27,5 GtCO₂eq, was verglichen zu 2012 ungefähr eine Verdoppelung innerhalb von 42 Jahren bedeutet, bzw. dass rund die Hälfte aller anthropogenen Emissionen seit Beginn der Industrialisierung um 1750 aus der Zeit zwischen 1970 und 2012 stammen.³¹²

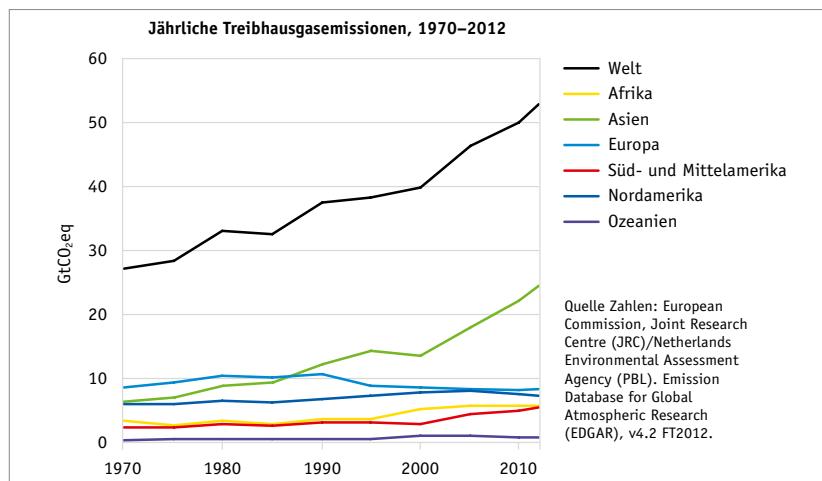


Abb. 5.1 Jährliche Treibhausgasemissionen.

Agency, Trends in Global CO₂ and total greenhouse gas emissions. **Kohlendioxidemissionen:** IEA, CO₂ Emissions from Fuel Combustion (kürzere Fassung im Bericht »Highlights«); Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC) (<http://cdiac.ornl.gov>, Data, Fossil-Fuel CO₂ Emissions); und EDGAR (separate Sammlung). Aufgrund abweichender Methodologien können Unterschiede bei den veröffentlichten Emissionszahlen entstehen. Siehe für einen Vergleich IPCC, AR5 WGIII, S. 362. Für eine weitergehende Analyse der Zahlen siehe zum Beispiel den jährlichen Bericht Trends in Global CO₂ and total greenhouse gas emissions der PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, den jährlichen Bericht Global Carbon Budget Presentation des Global Carbon Project (GCP); und die Analysen des Climate Action Tracker (CAT). Für einen indexierten Vergleich europäischer Länder und weitere europäische Statistiken siehe das statistische Amt der Europäischen Union (Eurostat) (<http://ec.europa.eu/eurostat>, Daten, Datenbank, Umwelt und Energie, Umwelt, Emissionen von Treibhausgasen und Luftschadstoffen).

³¹⁰ Basierend auf EDGAR-Zahlen. Siehe auch IPCC, AR5 WGIII, 5.2.1 (S. 357).

³¹¹ PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, (2017), 2.1 (S. 8).

³¹² Basierend auf EDGAR-Zahlen. Vgl. auch IPCC, AR5 WGIII, SPM.3 (S. 7).

5.2 Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum

Diese Entwicklung muss vor dem Hintergrund von zwei hauptsächlichen Antriebskräften³¹³ der Treibhausgasemissionen, das **Bevölkerungs- und das Wirtschaftswachstum**, betrachtet werden. Das Wirtschaftswachstum wird normalerweise in Form der Veränderung des Bruttoinlandsprodukts (BIP) ausgedrückt, also dem Wert aller Güter (Waren und Dienstleistungen), die innerhalb eines Jahres von einer Volkswirtschaft produziert werden. Die Bevölkerung und die Wirtschaft sind durch deren Energiekonsum und andere Faktoren (siehe unten, Kapitel 5.4) die Verursacher der Emissionen. Ein Wachstum dieser Verursacher führt daher selbst bei konstanter Intensität zu einer Zunahme der absoluten Emissionen.

Dazu kommt, dass mehr wirtschaftlicher Wohlstand normalerweise auch mit mehr Konsum und daher mit mehr Emissionen des Individuums verbunden ist: Wird das Wirtschaftswachstum losgelöst vom Bevölkerungswachstum als Pro-Kopf (*per capita*)-Wirtschaftswachstum berechnet, gilt es als Maßstab des zunehmenden Reichtums einer Gesellschaft, welcher in der Regel zu einem erhöhten Energiebedarf und entsprechenden Emissionen führt. Auf der anderen Seite sind nicht alle Wirtschaftszweige gleich emissionsintensiv. Der Dienstleistungssektor zum Beispiel beeinflusst die Emissionen praktisch nicht, ganz im Gegensatz zur Schwerindustrie. Im Falle der Wirtschaft ist der Zusammenhang mit den Emissionen daher komplexer als bei den Bevölkerungszahlen.

Neben dem Bevölkerungs- und dem Wirtschaftswachstum werden oft zwei zusätzliche wichtige Faktoren, welche sich auf die Emissionen auswirken, angeführt. Energieabhängige Emissionen können anhand ihrer **Intensität** analysiert werden. Die **Energieintensität des Bruttoinlandsprodukts** (*energy intensity*) ist das Verhältnis der verbrauchten Energie zu einer Einheit des BIP und gilt als Indikator für die Effizienz des Energieverbrauchs bei der Produktion von Gütern und Erbringung von Dienstleistungen. Und die **Kohlenstoffintensität der Energie** (*carbon intensity*) beschreibt das Verhältnis der Kohlendioxidemissionen per Energieeinheit und stellt den Zusammenhang mit der Art der Energiegewinnung her.³¹⁴ Reduktionspotenzial durch politische Maßnahmen und tech-

³¹³ Für eine exemplarische Aufzählung weiterer Faktoren, welche sich auf die Emissionen auswirken, und deren Analyse siehe IPCC, AR5 WGIII, 5.3 (S. 364–365).

³¹⁴ IPCC, AR5 WGIII, 5.3.4.2 und 5.3.4.3 (S. 376–380), 5.8 (S. 395), 6.3.1.2 (S. 425), Glossary »Carbon intensity« (S. 1255) und »Energy intensity« (S. 1261). Im Falle der Kohlendioxidemissionen wird oft

nologische Entwicklungen liegen vor allem in diesen beiden Bereichen. Dabei ist der sog. *rebound effect* zu beachten, das Phänomen, wonach eine Reduktion der Emissionen durch Maßnahmen im Energiebereich manchmal durch Änderungen im Konsum- und Produktionsverhalten der Bevölkerung in Reaktion darauf wieder zunichte gemacht wird.³¹⁵ Sind Produkte energieeffizienter und ist dadurch deren Gebrauch günstiger (und umweltfreundlicher), werden sie tendenziell mehr benutzt oder die Einsparungen werden durch die Benutzung anderer energieverbrauchender Güter oder Dienstleistungen ausgegeben.

In Zahlen ausgedrückt ergibt sich folgendes Bild: Während sich die Treibhausgasemissionen global zwischen 1990 und 2012 weltweit um 41 % von rund 38,2 GtCO₂eq auf 54 GtCO₂eq³¹⁶ erhöht haben, wuchs die Bevölkerung im selben Zeitraum um 34 % von 5,3 Milliarden auf 7,1 Milliarden Menschen³¹⁷ und die Wirtschaftsleistung (Bruttoinlandsprodukt) um 110 % von 39 500 auf 83 000 Milliarden USD.³¹⁸ Die Pro-Kopf-Emissionen stiegen in dieser Zeit also leicht um 6 % an und die Emissionen pro Einheit des Bruttosozialprodukts nahmen um 33 % ab, es wurde weniger emissionsintensiv produziert.

Der generelle Trend der Pro-Kopf-Emissionen seit 1970 verläuft allerdings relativ horizontal.³¹⁹ Der eingangs erwähnten Erhöhung der Emissionen zwischen 1970 und 2012 um 96 % steht eine fast ebensolche Erhöhung der Weltbevölkerung von 92 % (3,7 auf 7,1 Milliarden) gegenüber.³²⁰ Aufgrund der jährlichen Fluktuation können sich je nach gewähltem Anfangs- und Endzeitpunkt Abweichungen ergeben, welche aber über längere Zeiträume nicht relevant sind. Zwischen 1970 und 2010 zum Beispiel betrug das Wachstum der Emissionen 85 % (von 27,5 auf 51 GtCO₂eq)³²¹ und das der Bevölkerung 86 % (von 3,7 auf 6,9 Milliarden).³²² Der Anstieg der Bevölkerung und der Emissionen verläuft

die sogenannte *Kaya-Identity* zur Analyse der Einflussfaktoren herangezogen. Diese von Yoichi Kaya aufgestellte Gleichung stellt die Kohlendioxidemissionen als Produkt der Faktoren Bevölkerung, BIP pro Kopf, Energieintensität des BIP und Kohlendioxidintensität der Energie dar: CO₂ emissions = population × GDP/population × energy/GDP × CO₂ emission/energy. IPCC, AR5 WGIII, Box 5.1 (S. 368). Siehe auch International Energy Agency (2014b), S. 20; International Energy Agency (2016a), S. 144.

³¹⁵ IPCC, AR5 WGIII, 3.9.5 (S. 249–250), Glossary »Rebound effect« (S. 1269).

³¹⁶ EDGAR

³¹⁷ United Nations (2015). Siehe auch International Energy Agency (2014b), S. 72.

³¹⁸ International Energy Agency (2014b), S. 69. 2005 USD, kaufkraftbereinigt.

³¹⁹ IPCC, AR5 WGIII, Figure 5.2 (S. 358).

³²⁰ United Nations (2015).

³²¹ EDGAR. Siehe auch IPCC, AR5 WGIII, 5.2.1 (S. 357) (leicht abweichend).

³²² United Nations (2015). Siehe auch IPCC, AR5 WGI, 5.3.2.1 (S. 368) (leicht abweichend).

seit 1970 also ungefähr gleich, die Emissionen betrugen zu beiden Zeitpunkten etwas über 7 tCO₂eq pro Person (Abb. 5.2).

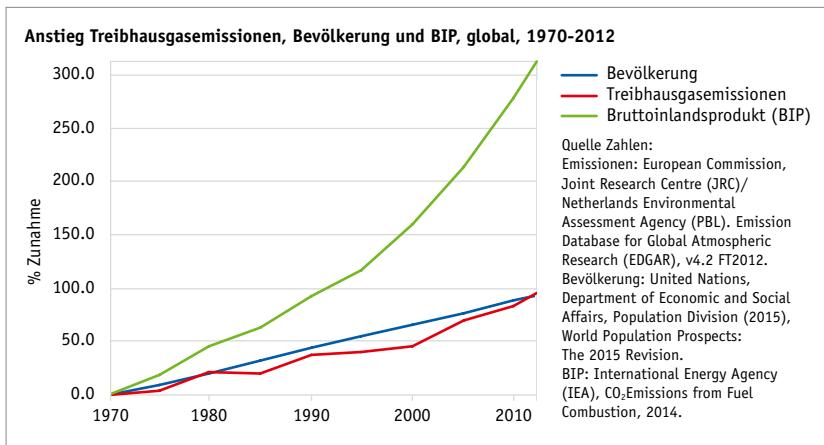


Abb. 5.2 Prozentualer Anstieg Treibhausgasemissionen, Bevölkerung, BIP. Die prozentuale (bzw. indexierte) Betrachtungsweise zeigt das Verhältnis zwischen dem Anstieg der Bevölkerung, der Wirtschaftsleistung und der Emissionen auf.

Anders sieht es aus, wenn man weiter zurückblickt. Verlässliche Schätzungen vor 1970 existieren nur für Kohlendioxidemissionen. Dabei zeigt sich, dass der Zeitraum von 1900 bis 1980 durch einen steten Anstieg der Pro-Kopf-Emissionen von Kohlendioxid (hier ohne Emissionen aus der Landnutzung und Landnutzungsänderung) gekennzeichnet ist (Abb. 5.3).³²³

Regional bestehen große Unterschiede (Abb. 5.4). Die durchschnittlichen **Pro-Kopf-Emissionen** aller Treibhausgase (inkl. Emissionen aus der Landnutzung und Landnutzungsänderung) betrugen 2012:³²⁴

In Afrika 5,2 GtCO₂eq, in Asien 5,8 GtCO₂eq (in dieser Region fällt China mit 9,2 GtCO₂eq stark ins Gewicht), in Europa 11,2 GtCO₂eq (Osteuropa und Russland 14,2 GtCO₂eq, Nord-, West- und Südeuropa 9,2 GtCO₂eq), in Süd-

323 Es handelt sich dabei um eine Annäherung. Weit zurückliegende Zahlen beruhen auf Schätzungen, und je weiter in der Vergangenheit diese liegen, umso größer sind die Unsicherheiten. Siehe für die Pro-Kopf-Kohlendioxidemissionen aus dem Verbrennen fossiler Treib- und Brennstoffe seit 1971 auch International Energy Agency (2014b), S. 84. Für die Schweiz siehe Bundesamt für Umwelt (2014), S. 57.

324 Bevölkerungszahlen und geografische Aufteilung gemäß United Nations (2015) (separate Liste der geografischen Aufteilung im Dokument »Classification of Countries by Major Area and Region of the World«). Emissionszahlen gemäß EDGAR.

und Mittelamerika 9,3 GtCO₂eq, in Nordamerika 21,1 GtCO₂eq und in Ozeanien 22,9 GtCO₂eq (vor allem verursacht durch Australien und Neuseeland). Der Anteil aller Treibhausgasemissionen von 1850 bis 2005 entfällt gemäß Schätzungen zu ungefähr 75 % auf die Industrieländer und zu 25 % auf die Entwicklungsländer.³²⁵

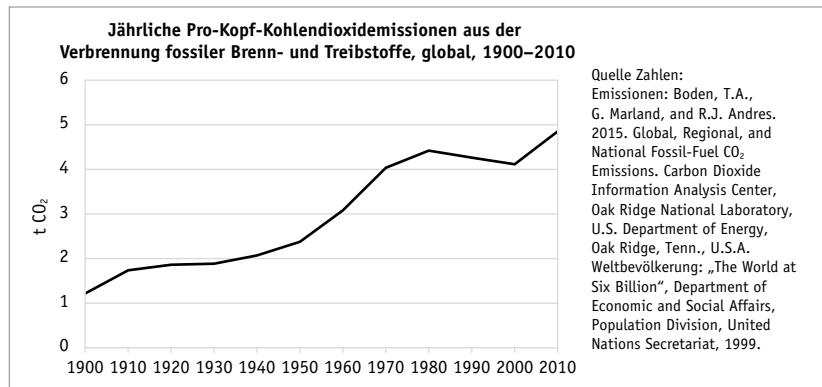


Abb. 5.3 Jährliche Pro-Kopf-Kohlendioxidemissionen aus der Verbrennung fossiler Brenn- und Treibstoffe (Annäherung).

Das Bild wandelt sich weiter nach Einbezug der Quelle der Emissionen. Entwicklungsländer generieren die meisten Emissionen im Sektor der Landnutzung und Landnutzungsänderung, in erster Linie durch die Rodung von Wald. Werden nur die Kohlendioxidemissionen aus der Verbrennung fossiler Treib- und Brennstoffe berücksichtigt, so ergeben sich zum Beispiel für Afrika Pro-Kopf-Emissionen von 0,95 tCO₂ im Jahr 2012 und für Asien ohne China, Japan und Südkorea 1,59 tCO₂.³²⁶

325 Ackermann et al. (2012), S. 10. Aufteilung in Industrieländer und Entwicklungsländer gemäß Annex-I- und Nicht-Annex-I-Staaten im U.N.-Rahmenübereinkommen über Klimaänderungen (siehe unten, Kapitel 6.1). Siehe auch IPCC, AR5 WGIII, 1.3.2 (S. 129), Fig. 1.8 b (S. 131).

326 International Energy Agency (2014b), S. 85–86. Siehe auch IPCC, AR5 WGIII, Fig. 1.6 (S. 128). Dies ist bei einem Vergleich von Abb. 5.3 betreffend der Pro-Kopf-Emissionen von Kohlendioxid mit den anderen Grafiken in diesem Kapitel, welche alle Treibhausgase einbeziehen, zu beachten.

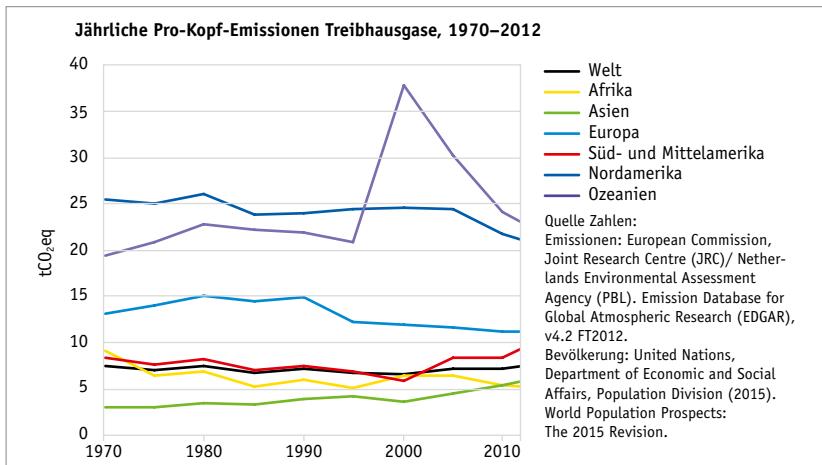


Abb. 5.4 Jährliche Pro-Kopf-Emissionen Treibhausgase. Die Emissionen von Ozeanien können wegen Waldbränden in Australien von Jahr zu Jahr stark fluktuieren.

5.3 Produktion und Konsum

Die Emissionen eines Landes können basierend auf der Produktion oder dem Konsum von Gütern und Dienstleistungen gemessen werden.³²⁷ Im ersten Fall spricht man von **territorialen Emissionen** (*territorial emissions*) oder der Produktionsperspektive und es werden nur die Emissionen, welche im Produktionsland anfallen, berücksichtigt. Allerdings wird ein Teil der Güter und Dienstleistungen (inkl. Elektrizität) exportiert und im Ausland konsumiert bzw. es werden im Ausland hergestellte Güter und Dienstleistungen importiert. International gehandelte Waren vereinen etwa ein Viertel aller weltweiten Emissionen auf sich.³²⁸ Und die Konsumenten können ebensogut als die Verursacher von Emissionen der verbrauchten Güter und Dienstleistungen angesehen werden wie die Produzenten. Eine zweite Berechnungsmethode stützt sich daher auf die **Emissionen basierend auf dem Konsum** (*consumption-based emissions*) (Konsumperspektive). Dies umfasst Emissionen, welche durch die End-

³²⁷ Neben diesen beiden hauptsächlich angewandten Messmethoden (*accounting methods*) existieren noch andere Kriterien, nach welchen Emissionen ermittelt werden können. Siehe z. B. Steininger et al. (2016), S. 35.

³²⁸ Kander et al., (2015), S. 431.

nachfrage in einem Land im In- und Ausland ausgelöst wurden.³²⁹ Traditionell werden die Emissionen auf der Länderebene territorial erhoben. Dem Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen und damit zusammenhängenden Klimaverträgen liegen die territorialen Emissionen zugrunde. Diese Werte können mit großer Genauigkeit aufgrund von Wirtschaftsdaten festgestellt werden, während die Zahlen basierend auf dem Konsum mit größeren Unsicherheiten behaftet sind und verschiedene Methoden für deren Berechnung existieren.³³⁰ Doch der durch den Handel entstehende Unterschied zwischen den Emissionen der Güterproduktion und des Güterkonsums ist bei einigen Ländern sehr groß und führt zu einer Verzerrung bei der Anrechnung von Emissionen, welche allein anhand der Produktion vorgenommen werden. Gemäß gängigen Erhebungen haben zum Beispiel zwischen 1990 und 2010 in den OECD-Mitgliedsländern des Jahres 1990 (Westeuropa, Japan, Kanada, USA, Australien und Neuseeland) die **territorialen Emissionen** von Kohlendioxid aus der Nutzung fossiler Energie um 6 % zugenommen, während dieselben Emissionen gemessen am **Konsum** um 22 % gestiegen sind.³³¹ Die Produktion und die damit zusammenhängenden Emissionen wurden zunehmend in Drittländer verlagert und die Emissionen aus importierten Gütern stiegen an. In der Exportregion Asien liegt der Fall entsprechend umgekehrt: Während die **territorialen Emissionen** in demselben Zeitraum um 197 % zunahmen, stiegen die Emissionen des **Konsums** nur um 175 %. Dies ist insbesondere dann relevant, wenn wie hier die importierenden Länder Emissionsziele unter einem Klimaabkommen haben, das auf territorialen Emissionen basiert, und die exportierenden Länder nicht (siehe Näheres unten, Kapitel 6.2). Das Phänomen, wonach Emissionen, welche durch nationale oder internatio-

329 IPCC, AR5 WGIII, Box 5.2 (S. 373); Jungbluth et al. (2011), S. 7–9, insbes. Abb. 1 und Abb. 2; Frischknecht et al. (2014), 1.1 (S. 21–22).

330 IPCC, AR5 WGIII, Box 5.2 (S. 373).

331 IPCC, AR5 WGIII, 5.3.1.1 (S. 367); Siehe auch Peters et al. (2011), generell; Kander et al. (2015), generell; und unten, Text bei Anmerkung 425. Die Zahlen weichen wie erwähnt je nach der Methode der Berechnung voneinander ab. Werden zum Beispiel Emissionen exportierter Güter im Umfang, in welchem sie im Importland oder auf dem Weltmarkt höher als im Exportland ausgefallen wären, abgezogen, reduziert sich der Unterschied in der Entwicklung der Emissionen zwischen Produktion und Konsum bei einigen Ländern markant. Mit anderen Worten, wird ein Exportartikel emissionsärmer produziert als dies der Fall gewesen wäre, wenn er im Importland oder auf dem Weltmarkt produziert worden wäre, so führt dies genau betrachtet zu einer Reduktion der weltweiten Emissionen durch das exportierende Land. Doch diese Reduktion wird normalerweise den Konsumenten im Importland angerechnet, und nicht dem Produktionsland. Kander et al. (2015), S. 431, 432. Siehe auch Steininger et al. (2016), S. 38.

nale Reglementierungen in einem Land eingeschränkt werden, in einem anderen Land anfallen, werden als **graue Emissionen (carbon leakage)** bezeichnet.³³² Doch keine Messmethode ist perfekt, sie alle haben Vor- und Nachteile.³³³

Die Anwendung der verschiedenen Betrachtungsweisen kann zu starken Abweichungen der Resultate und somit der Beurteilung der Situation führen. In der Schweiz zum Beispiel blieben die unter das Kyoto-Protokoll fallenden absoluten territorialen Emissionen zwischen 1996 und 2011 etwa konstant. Aus der Konsumperspektive nahmen diese Emissionen hingegen um 17 % zu. Pro Kopf veränderten sich die konsumbedingten Emissionen andererseits wiederum nur geringfügig. Werden die Ozonschicht abbauende Substanzen mitberücksichtigt³³⁴ (für welche in der Zukunft aber kein Reduktionspotenzial mehr existiert), also alle Treibhausgase einbezogen, so blieben die konsumbedingten Pro-Kopf-Emissionen etwa konstant und in absoluten, territorialen Zahlen lag eine Reduktion von 17 % vor.³³⁵ Je nach Sichtweise lässt sich also dieselbe Situation mit einer Zu- oder Abnahme von 17 % der Emissionen oder einer ungefähr konstanten Entwicklung beschreiben. Das Beispiel ließe sich weiter variieren. Es muss genau hingeschaut werden, wie sich eine Zahl zusammensetzt.

5.4 Quellen der Emissionen

Aufgrund von Verbrauchsstatistiken³³⁶ und anderer Hilfsmittel wie Satellitenbildern kann eine genaue Aufteilung der Emissionsquellen nach Aktivitäten vorgenommen werden (siehe Übersicht in Abb. 5.5).

Wie in Kapitel 1.8 gesehen, bestanden die anthropogenen Treibhausemissionen 2010 zu rund 76 % aus **Kohlendioxid** (37,5 GtCO₂ von 49,5 GtCO₂eq insgesamt).³³⁷ Kohlendioxid ist seit der Industrialisierung insbesondere durch die

332 Yoshida (2014), 2.1.1 (S. 9–10), 2.2 (S. 12–16, insbes. S. 14 unten).

333 Steininger et al. (2016), S. 38.

334 Diese Substanzen sind ebenfalls Treibhausgase, welche aber unter das Montrealer Abkommen fallen, und 2011 praktisch vollständig eliminiert wurden. Siehe unten, Anmerkungen 41, 143.

335 Frischknecht et al. (2014), 4.3.1 (S. 67–72); Bundesamt für Umwelt (2014), S. 68–71.

336 Siehe z. B. IPCC, AR5 WGI, 6.1.2.1 (S. 474), im Fall von Kohlendioxid.

337 Die Werte sind mittels eines Treibhauspotenzials für 100 Jahre berechnet (GWP 100). IPCC, AR5 WGIII, Figure 1.3 (S. 123). Die Zahlen in IPCC, AR5 WGIII basieren in erster Linie auf den Angaben von EDGAR und der International Energy Agency (IEA). IPCC, AR5 WGIII, Figure 1.3 (S. 123), 5.2.1 (S. 358), Figure 5.2 (S. 358). Im Falle des Kohlendioxid entspricht der CO₂-Wert dem CO₂eq-Wert, weshalb dieser auf beide Arten ausgedrückt werden kann.

Nutzung fossiler Energieträger und das Abholzen von Wäldern, also durch das Auflösen von Kohlenstoffspeichern, in großen Mengen in die Atmosphäre gelangt: Von den 37,5 GtCO₂ gehen 32 GtCO₂ bzw. 65 % aller Emissionen³³⁸ und 84 % der Kohlendioxid-Emissionen auf die **Nutzung fossiler Energieträger** (Verbrennen fossiler Brenn- und Treibstoffe) und auf **industrielle Prozesse** zurück. Dabei fielen 2,6 GtCO₂ bzw. 5 % aller Emissionen und 8,1 % der Kohlendioxidemissionen bei **industriellen Prozessen** an,³³⁹ insbesondere bei der Zementproduktion, und 29,4 GtCO₂ bzw. 60 % aller Emissionen und 77 % der Kohlendioxidemissionen bei der **Nutzung fossiler Energieträger**, also der Gewinnung von Energie durch Kraftwerke und Motoren oder der Erzeugung von Wärme.³⁴⁰ Von Letzteren wurden 13,3 GtCO₂ bzw. 26 % aller Emissionen und 44 % der Kohlendioxidemissionen durch die **Industrie** direkt sowie indirekt durch die Zulieferung von Elektrizität und Wärme generiert, 6,9 GtCO₂ bzw. 14 % aller Emissionen und 23 % der Kohlendioxidemissionen durch den **Verkehr** (davon 5 GtCO₂ bzw. 10 % aller Emissionen und 17 % der Kohlendioxidemissionen durch den Straßenverkehr, der Rest durch Schiene, Luft und Seefahrt) und 5,4 GtCO₂ bzw. 11 % aller Emissionen und 18 % der Kohlendioxidemissionen durch **Privathaushalte**. 4,6 GtCO₂ bzw. 9 % aller Emissionen und 15 % der Kohlendioxidemissionen entfallen auf eine **Restgruppe**, welche unter anderem die Dienstleistungen beinhaltet.³⁴¹

338 IPCC, AR5 WGIII, Fig. 1.3 (S. 123); IPCC, AR5 Synthesis Report, 1.2.2 (S. 46). Zwischen 1750 und 2011 wurden etwa 375 PgC (1 375 GtCO₂) Kohlendioxid durch das Verbrennen fossiler Brenn- und Treibstoffe und etwa 180 PgC (660 GtCO₂), also ein Drittel, durch Landnutzungsänderungen verursacht. IPCC, AR5 WGI, 6.3.1 (S. 486).

339 Davon stammen 1,35 GtCO₂ oder 2,7 % aller Emissionen aus der Zementproduktion und die restlichen 1,24 GtCO₂ oder 2,5 % aus anderen industriellen Prozessen wie der Chemie- oder Eisenproduktion (wo fossile Energieträger als Rohstoffe verwendet werden). Dazu kommen CO₂-Emissionen aus dem Abfall und Abwasser, welche 0,03 GtCO₂ oder 0,06 % aller Emissionen und 0,09 % der CO₂-Emissionen ausmachen. IPCC, AR5 WGIII, 10.3.1 (S. 749). Siehe auch IPCC, AR4 WGIII, 1.3.1. und Figure 1.1a und 1.1b (S. 103). Die Einteilung der industriellen Prozesse erfolgt dort anders, siehe Fußnoten 7 und 8 zu Figure 1.1a. Siehe auch IPCC, AR5 WGIII, 1.2.5 (S. 122). Die Zahl der Kohlendioxidemissionen der industriellen Prozesse wird von der International Energy Agency mit 1,78 GtCO₂ (3,5 % aller Emissionen) beziffert. International Energy Agency (2014a), III.42.

340 Zahl im Umkehrschluss zu den Emissionen der industriellen Prozesse sowie Abfall und Abwasser. Siehe für die Verursacher IPCC, AR5 WGIII, FAQ 1.2 (S. 142). Im Falle der Elektrizitäts- und Wärmeproduktion, welche von anderen Sektoren genutzt wird, unterscheidet das IPCC zwischen direkten und indirekten CO₂-Emissionen. IPCC, AR5 WGIII, Figure 1.3 a) und b) (S. 123), Annex II.5 (S. 1295).

341 Für die Zahlen in Gt siehe IEA (2012), S. 72. Aufgrund der unterschiedlichen Quellen weicht die Summe leicht von derjenigen des IPCC ab. Die Prozentzahlen wurden dennoch basierend auf den obenstehenden Gesamtergebnissen des IPCC berechnet.

Die restlichen Kohlendioxidemissionen des Jahres 2010, 5,5 GtCO₂ bzw. 11 % aller Treibhausgase³⁴² stammen aus dem Sektor **Forstwirtschaft und andere Landnutzung** (*Forestry and Other Land Use* (FOLU)). Dieser Sektor bemisst die Freisetzung des in der Vegetation gespeicherten Kohlenstoffs und allenfalls (je nach Berechnungsweise) auch die Aufnahme von Kohlendioxid.³⁴³ Der Begriff FOLU wird vom IPCC synonym mit demjenigen der Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (*Land Use, Land Use Change and Forestry* (LULUCF)) verwendet.³⁴⁴ Ursprünglich wurde der Sektor mit »Land Use Change and Forestry« bezeichnet. Dies beinhaltete neben der Entwaldung zur Gewinnung von landwirtschaftlich oder anderweitig genutzten Flächen (Landnutzungsänderung) auch Situationen, in welchen keine Umnutzung des Bodens stattfand, zum Beispiel das Fällen von Bäumen zum Zweck der Holzgewinnung. Der Vollständigkeit halber wurde daher der Begriff der Landnutzung hinzugefügt.³⁴⁵ Die kürzere Bezeichnung der Landnutzungsänderung (*Land Use Change* (LUC)) ist ebenfalls gebräuchlich und wird offenbar manchmal als Unterbegriff von, manchmal als gleichbedeutend mit der Landnutzung bzw. FOLU verwendet.³⁴⁶ Der Ausdruck Forstwirtschaft schlussendlich beinhaltet normalerweise

342 11 % von 49,5 GtCO₂eq. Diese Zahl wird in IPCC, AR5 für 2010 offenbar nur in Form der 11 % erwähnt. Sie hat einen großen Unsicherheitsfaktor von +/- 2,5 Gt. IPCC, AR5 WGIII, Fig. 1.3, Legende (aus WGI, Table 6.1 für Nettoemissionen).

343 Der hier angegebene Wert bezieht die Emissionen von Kohlendioxid, nicht auch die Aufnahme (also nur Bruttoflüsse). Siehe dazu unten, Anmerkung 355.

344 IPCC, AR5 WGIII, Glossary »Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU)« (S. 1251–1252); Goodman, Herold (2014), Box 1 (S. 8). Sinngemäß auch IPCC, AR5 WGIII, II.2.3 Fußnote 3 (S. 825). Der Begriff LULUCF wurde im Jahr 2003 in der IPCC Good Practice Guidance for Land Use, Land Use Change and Forestry verwendet. In den darauffolgenden 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories wurde dann der Sektor LULUCF mit dem zuvor separat geführten Sektor *agriculture* unter dem Begriff AFOLU vereint, da eine Unterscheidung zwischen den beiden schwierig war.

345 »Some confusion arises from the use of the term 'land-use change' in the IPCC Guidelines because many of the stock changes (especially in forest pools) are not associated with a change in land use. For example, 'commercial management [or] harvest of industrial roundwood (logs) and fuelwood' is a land use but not a land-use change. Similarly, changes in cropping practice, such as minimum tillage that reduces soil disturbances and consequential carbon loss, are described in the IPCC Guidelines even though they are not associated with changes in land use. [...] The title of this Special Report incorporates the term 'land use' as well as 'land-use change' [...]. This chapter and subsequent chapters deal with situations in which significant changes in carbon stocks might occur, regardless of whether they are associated with changes in land use.« IPCC, Special Report Land Use, 2.2.1.

346 Siehe für die Bezeichnung LUC IPCC, AR5 WGIII, Glossary »Land use change (LUC)« (S. 1265) und IPCC, AR5 WGI, Glossary »Land use and land use change« (S. 1456). In IPCC, AR5 WGIII wird manchmal explizit darauf hingewiesen, dass FOLU-Werte die Landnutzungsänderung beinhalten (z. B. IPCC, AR5 WGIII, Figure II.6 (S. 824), Figure II.7 (S. 826)). Entspricht FOLU dem Begriff des LULUCF, sollte dies immer der Fall sein. IPCC, AR5 WGI verwendet die Begriffe *land use* und *land use change*, ohne dass klar ist, ob ein Unterschied besteht (IPCC, AR5 WGI, 6.3.2.2 (S. 489–491)), und

alle Aktivitäten im Zusammenhang mit Waldflächen, also Nutzung und Pflege sowie Veränderungen des Bestands (Entwaldung oder Aufforstung). Er wird manchmal als in der Landnutzung bzw. Landnutzungsänderung inbegriffen angesehen und manchmal separat angeführt.³⁴⁷ Die Terminologie in diesem Sektor ist generell nicht einheitlich und hängt von der jeweiligen Definition ab.³⁴⁸

Die Kohlendioxid-Emissionen dieses Sektors entstehen wie erwähnt durch die Freisetzung des in der Biomasse gespeicherten Kohlenstoffs. Der Anteil anderer Treibhausgase, vor allem durch Feuer und die Trockenlegung von Mooren (*peatlands*), ist gering und sehr schwer zu schätzen.³⁴⁹ Ursache für die Kohlendioxidemissionen ist in erster Linie das Roden von Wäldern (zwischen 2001 und 2010 im Schnitt und unter Berücksichtigung aller Treibhausgase 3,8 GtCO₂eq pro Jahr), insbesondere Regenwälder, in der Regel zwecks Umwandlung in Agrarflächen oder für die Holzgewinnung.³⁵⁰ Emissionen werden aber auch durch die Trockenlegung von Mooren (*peatlands*) sowie Waldbrände und Torffeuern (*peat fires*) verursacht.³⁵¹ Die Zahlen im Sektor FOLU haben allerdings einen sehr hohen Unsicherheitsfaktor von 50 %–75 %.³⁵²

Der FOLU-Sektor besitzt die Besonderheit, dass die menschlichen Aktivitäten hier auch zu einer Reduktion des Kohlendioxids in der Atmosphäre aufgrund der vermehrten Aufnahme des Gases durch die Vegetation füh-

IPCC, AR5 WGIII, 5.2.1 (S. 359) spricht in diesem Abschnitt allein von *land use changes*, während an anderen Stellen in WGIII auch von *land use* die Rede ist (z. B. 1.3.1 (S. 127) oder Fig. 1.8c (S. 132)). Die CO₂-Zahlen, welche in IPCC, AR5 WGIII, Table 11.1 (S. 825) für den AFOLU-Sektor angegeben werden (der Landwirtschaftssektor enthält keine CO₂-Emissionen (IPCC, AR5 WGIII, 11.2.2 (S. 822)), womit diese Zahlen als solche des FOLU-Sektors zu verstehen sind) entsprechen jedoch größtenteils denjenigen der Landnutzungsänderung (LUC) in IPCC, AR5 WGI, Table 6.1 (S. 486).

347 Goodman, Herold (2014), Box 1 (S. 8).

348 IPCC, Special Report Land Use, 2.2.1.2.

349 IPCC, AR5 WGI, 11.2.3 (S. 825), Box 11.1 und 11.2 (S. 828). IPCC, Special Report Land Use, Summary for Policy Makers, para.11 (S. 4).

350 IPCC, AR5 WGI, 11.2.3 (S. 829); IPCC, AR4 WGI, 7.3.2.1.2 (S. 517); IPCC, Special Report Land Use, 2.2.1; Goodman, Herold (2014), Executive Summary (S. 2), 3.1 (S. 12). Unter den 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories wurde die Ernte von Holz zum Zweck der Weiterverarbeitung in Gegenstände als sofortige Emission eingestuft, obwohl das Kohlendioxid für den Zeitraum ihrer Benutzung im Holz gebunden bleibt. Diese vereinfachte Sichtweise basiert auf dem Gedanken, dass Holzprodukte oft andere Holzprodukte ersetzen, welche sodann entsorgt werden, wodurch das Kohlendioxid freigesetzt wird und somit die Höhe des im Holz gebundenen Kohlenstoffs immer etwa gleich bleibt, der Input also etwa dem Output entspricht. Die 2006 Guidelines hingegen enthalten eine differenziertere Berechnungsmethode. Siehe 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Chapter 12, Harvested Wood Products, 12.1 Introduction; Iversen et al. (2014), 5. (S. 42–45).

351 IPCC, AR5 WGI, 6.3.2.2 (S. 489); IPCC, AR5 WGIII, 11.2.3 (S. 829).

352 IPCC, AR5 WGI, Table 6.1 (S. 486); IPCC, AR5 WGIII, 5.2.1 (S. 359), 5.2.3.4 (S. 363), Table 11.1 (S. 825).

ren können. Dies ist insbesondere bei der Aufforstung und Pflege von Wäldern (Forstwirtschaft) der Fall, welche in der Wachstumsphase als **Kohlen-dioxidsenken (sinks)** wirken, indem sie durch den Einbau des Kohlenstoffs in ihre Biomasse mehr Kohlendioxid aufnehmen als sie abgeben. Ein ausgewachsener Wald ohne Außeneinwirkung steht im Gleichgewicht mit der Umwelt, es wird durch das Absterben der Bäume gleich viel Kohlendioxid abgegeben, wie durch das Nachwachsen aufgenommen wird (und dies gilt grundsätzlich für alle Vegetation).³⁵³ Die Messung der Emissionen aus Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft kann individuelle Abgaben oder Aufnahmen betreffen (Bruttoflüsse, *gross fluxes*) oder den Saldo aller Emissionen und der Aufnahme (Nettoflüsse, *net fluxes*).³⁵⁴ Die oben wiedergegebene Zahl der FOLU-Emissionen des IPCC beschreibt die Bruttowirkung der Emissionen von Kohlendioxid.³⁵⁵ Im Falle der Rodung von Tropenwäldern fallen die Bruttoemissionen aufgrund des Nachwachsens von Vegetation etwa doppelt so hoch aus wie die Nettoemissionen.³⁵⁶

Bei manchen Emissionen und Aufnahmen, wie zum Beispiel Brände, ist es schwer oder unmöglich, jedes Mal festzustellen, ob sie auf natürliche Ursachen oder menschliche Einflüsse zurückzuführen sind. Es existieren verschiedene **methodische Ansätze der Messung** der Emissionen und Aufnahme in diesem Sektor und der Trennung dieser beiden Ursachen.³⁵⁷ Als bestimmender Faktor kann gelten, ob die Vorgänge Vegetation betreffen, welche aktiv bewirtschaftet bzw. gepflegt (*managed*) wird, oder nicht. Nichtbewirtschaftete Flächen gelten als im Kohlendioxidgleichgewicht, es besteht die Annahme, dass so viel Koh-

353 Siehe z. B. Archer (2010) S. 106; Schlamadinger et al. (2007b), S. 299; Bundesamt für Umwelt (2006), Abb. 1; Bolin (2007), S. 160.

354 Siehe dazu und für die Beschreibung von Messmethoden in IPCC, AR5 WGI, 6.3.2.2 (S. 489).

355 Dies wird nirgends explizit erwähnt, kann aber daraus gefolgt werden, dass die Zahlen in der Grafik IPCC, AR5 WGIII, Fig. 1.3c (= Fig. SPM.1 (S. 7) = Fig. TS.1 (S. 42)) auf EDGAR-Zahlen beruhen, welche nur die Emissionen beinhalten (siehe oben, Anmerkung 309). Die Zahlen in WGI und in WGIII, Chapter II sind netto (WGI, Table 6.1 (S. 486), in GtCO_2/yr ; WGIII, Table 11.1 (S. 825), in PgC yr^{-1}), und auch die Angabe in WGIII, 5.2.1 (S. 359). Entsprechend liegt diese Zahl etwas tiefer, für den Durchschnitt 2002–2011 bei $3,3 \text{ GtCO}_2/\text{yr}$ (WGIII, 5.2.1 (S. 359)) $\times 3,667 = 0,9 \text{ PgC yr}^{-1}$ (WGI, Table 6.1 (S. 486)). Da die Grafik WGIII, Figure 1.3c auf EDGAR-Zahlen beruht, ist die Aussage in WGIII, 5.2.1 (S. 358), dass die $37,5 \text{ GtCO}_2/\text{yr}$ Netto-FOLU-Zahlen beinhalten, inkorrekt und wurde auf Hinweis des Autors in den Errata für AR5 WGIII betr. S. 358 korrigiert. IPCC, AR4 WGIII enthält nur Emissionszahlen. Siehe dort, Summary for Policymakers, Fußnote 4 (S. 3). Zahlen der United Nations Framework Convention on Climate Change und des Kyoto-Protokolls werden sowohl mit als auch ohne LULUCF angegeben.

356 IPCC, AR5 WGI, 6.3.2.2 (S. 491). Siehe auch Schlamadinger et al. (2007a), S. 272.

357 Grassi et al. (2017), S. 222–224; IPCC, AR5 WGI, 6.3.2.2 (S. 489).

lendioxid emittiert wie aufgenommen wird bzw., dass Emissionen nicht anthropogen sind.³⁵⁸ Alle Vorgänge auf den bewirtschafteten Flächen, ob natürlichen oder menschlichen Ursprungs, werden als anthropogen eingestuft (sog. *managed land proxy*).³⁵⁹ Jedes Land stellt dafür ein Inventar von Wäldern und anderer Vegetation auf, welche entweder völlig sich selbst überlassen sind oder bewirtschaftet bzw. gepflegt (Forstwirtschaft) werden. Diese Methode wird unter der Klima-Rahmenkonventionen angewandt.³⁶⁰ Andere Methoden basieren die Schätzungen auf beobachteten Veränderungen in der Landoberfläche, so zum Beispiel auch der Bericht der Arbeitsgruppe I des IPCC.³⁶¹ Die so erhaltenen verschiedenen Zahlen weichen relativ stark voneinander ab.³⁶²

Die **landwirtschaftlichen Emissionen**, obwohl ebenfalls auf die Nutzung von Land zurückgehend, wurden in der Vergangenheit in einer separaten Kategorie der Landwirtschaft aufgelistet. Da die Unterscheidung zu anderen Landnutzungen bzw. Landnutzungsänderungen jedoch schwierig war, werden sie heute vom IPCC zusammen mit diesen in einem einzigen Sektor *Agriculture, Forestry and Other Land Use* (AFOLU) kombiniert.³⁶³ Aufnahme und Abgabe von Kohlendioxid werden im Sektor Landwirtschaft jedoch durch Ernten und Anpflanzen als ausgeglichen betrachtet, womit netto keine solchen Emissionen anfallen. Kohlendioxidemissionen, die durch das Betreiben landwirtschaftlicher Maschinen entstehen, sind in den Angaben über das Verbrennen fossiler Brenn- und Treibstoffe enthalten.³⁶⁴ Die Kohlendioxidemissionen durch die Nutzung von Land bzw. Landnutzungsänderungen werden im Teilsektor FOLU berücksichtigt. Die Emissionen der Landwirtschaft sind daher fast ausschließlich auf Nicht-

358 Siehe z. B. Schlamadinger et al. (2007b), S. 299. Spezifisch für Waldbrände: IPCC, AR5 WGIII, Box 11.2, Fußnote 1 (S. 828).

359 Siehe z. B. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Overview, Specific Developments in the 2006 IPCC Guidelines, unter Volume 4 (Agriculture, Forestry and Other Land Use) (S. II); Iversen et al. (2014), 2.1.3 (S. 16).

360 Basierend auf den 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories und der IPCC Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. Grassi et al. (2017), S. 222–224.

361 Grassi et al. (2017), S. 223–224; IPCC, AR5 WGI, 6.3.2.2 (S. 489).

362 Grassi et al. (2017), S. 222, 224.

363 Der Begriff AFOLU stammt aus den 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, welche Methodologien für die Erfassung von Treibhausgasemissionen aufstellen. Diese unterscheiden zwischen fünf hauptsächlichen Kategorien von Emissionen: *Energy; Industrial Processes and Product Use; Agriculture, Forestry, and Other Land Use; Waste; Other*. Die Vereinigung der beiden Kategorien *Agriculture* und *Land-use Change and Forestry* wurde in den IPCC-Berichten erstmals in AR5 übernommen. Siehe IPCC, AR5 WGIII, 11.1 (S. 818). Siehe auch Iversen et al. (2014), 1.2 (S. 4–5).

364 IPCC, AR5 WGIII, 11.2.2 (S. 822–823). Kohlendioxidemissionen aus der Nutzung fossiler Energieträger in der Landwirtschaft (Traktoren etc.) beliefen sich auf 0,4–0,6 GtCO₂ im Jahr 2010. IPCC, AR5 WGIII, 11.2.2 (S. 823).

Kohlendioxidemissionen beschränkt, in erster Linie Methan und Distickstoffmonoxid (siehe unten).³⁶⁵ Diese fallen insgesamt zu etwas mehr als der Hälfte in der Landwirtschaft an und werden in diesem Teilsektor auf zwischen 5,2 und 5,8 GtCO₂eq im Jahr 2010 geschätzt, also 10–12 % aller anthropogenen Emissionen.³⁶⁶ Rechnet man die oben genannten 5,4 GtCO₂ aus der Forstwirtschaft und anderer Landnutzung hinzu, so ergeben sich insgesamt rund 10–12 GtCO₂eq oder 20–24 % aller Emissionen, die dem Sektor **Agrikultur, Forstwirtschaft und andere Landnutzung (AFOLU)** zuzuordnen sind.³⁶⁷

Das zweitwichtigste Treibhausgas ist **Methan** (CH₄), mit 7,8 GtCO₂eq, 16 % aller anthropogenen Emissionen im Jahr 2010.³⁶⁸ Methan entsteht bei der anaeroben (sauerstofflosen) Zersetzung von organischem Material durch Mikroorganismen sowie bei der Gewinnung von fossilen Energieträgern (Lecks bei der Förderung von Erdgas, unvollständigen Verbrennung beim Abfackeln von nicht verwertbaren Gasen). Es fällt in erster Linie in der Landwirtschaft an (3,4 GtCO₂eq, 44 % der Methanemissionen des Jahres 2010),³⁶⁹ insbesondere als Folge der enterischen Fermentation (Darmgärung) von Vieh (im Jahr 2010 rund 2,1 GtCO₂eq oder 32–40 % der landwirtschaftlichen und 4 % aller Emissionen) und des Reisanbaus (0,5 GtCO₂eq oder 9–11 % der landwirtschaftlichen und 1 % aller Emissionen).³⁷⁰ Die weiteren hauptsächlichen Quellen sind Produktion, Transport und Nutzung von fossilen und Bio-Energieträgern (37 % der Methanemissionen 2010)³⁷¹ und die Verrottung von Abfall in Abfalldeponien (16 % der Methanemissionen 2010).³⁷² Auch die unterirdischen Erdgasreserven, welche als fossiler Brennstoff verwendet werden (u. a. Kochgas), bestehen größtenteils aus Methan, bei dessen Verbrennung allerdings Kohlendioxid entsteht. 50–65 % aller Methanemissionen sind durch den Menschen verursacht.³⁷³

365 IPCC, AR5 WGIII, Glossary »Emissions: Agricultural Emissions« (S. 1260).

366 IPCC, AR5 WGIII, II.2.2 (S. 822).

367 IPCC, AR5 WGIII, Figure 1.3 a) (S. 123), IPCC, AR5 WGIII, Executive Summary (S. 816). Siehe Details zu diesem Sektor auch in der Datensammlung der Food and Agriculture Organization (FAO) (<http://faostat.fao.org/>); und Tubiello et al. (2013).

368 IPCC, AR5 WGIII, Figure 1.3 c) (S. 123), 5.2.1 (S. 358). Siehe auch die detaillierten Angaben der International Energy Agency (2014a), Part III.

369 International Energy Agency (2014a), III.42.

370 IPCC, AR5 WGIII, II.2.2 (S. 823, 824).

371 International Energy Agency (2014a), III.42.

372 International Energy Agency (2014a), III.42. Siehe auch AR5 WGIII, 5.2.1 (S. 360).

373 IPCC, AR5 WGI, 6.1.2.2 (S. 475).

Distickstoffmonoxid (N_2O) ist das dritt wichtigste direkt durch den Menschen verursachte Treibhausgas und mit 3,1 GtCO₂eq verantwortlich für 6,2 % aller anthropogenen Emissionen im Jahr 2010.³⁷⁴ Distickstoffmonoxid entsteht vor allem in der Landwirtschaft (2,2 GtCO₂eq, 71 % der Distickstoffmonoxidemissionen 2010)³⁷⁵ durch natürliche und synthetische Düngemittel, und zu einem geringeren Anteil bei der Verbrennung fossiler Brenn- und Treibstoffe und von Biomasse, industriellen Prozessen, und bei der Abfall- und Abwasserentsorgung.³⁷⁶ Rund 40 % aller Distickstoffmonoxidemissionen entstehen durch menschliche Aktivitäten.³⁷⁷

Die **fluorierten Treibhausgase** (F-Gase, also Fluorkohlenwasserstoffe und Schwefelhexafluorid) umfassen rund 1 GtCO₂eq oder 2 % aller Emissionen im Jahr 2010.³⁷⁸ Sie sind starke Treibhausgase, welche aber nur in kleinen Mengen vorkommen. Sie entstehen künstlich in der industriellen Produktion und ersetzen in der Regel früher zu denselben Zwecken eingesetzte ozon-abbauende Substanzen.³⁷⁹ Fluorkohlenwasserstoffe kommen hauptsächlich als Kühlmittel in Klimageräten oder Kühlschränken zum Einsatz. Schwefelhexafluorid wird in Hochspannungsschaltanlagen sowie bei der Herstellung von Halbleitern und von Magnesium und Aluminium verwendet.

Es ergibt sich zusammengefasst folgendes Bild (Abb. 5.5): Rund **60 %** oder fast zwei Drittel der Treibhausgasemissionen im Jahr 2010 sind auf die **Nutzung fossiler Energieträger zurückzuführen**. Etwa 22 % oder ein Viertel wurden in Verbindung mit der **Landnutzung bzw. Landnutzungsänderung** (AFOLU-Sektor) verursacht, zur Hälfte durch die Landwirtschaft und zur anderen Hälfte durch die Forstwirtschaft und andere Landnutzung (FOLU).³⁸⁰ Die restlichen rund 18 % fallen bei **industriellen Prozessen, der Abfall- und Abwasserentsorgung und im Zusammenhang mit der Bereitstellung fossiler Energieträger (Gewinnung, Transport)** an.³⁸¹

³⁷⁴ IPCC, AR5 WGIII, Figure 1.3 a) (S. 123), 5.2.1 (S. 358).

³⁷⁵ International Energy Agency (2014a), III.43.

³⁷⁶ IPCC, AR5 WGIII, 5.2.1 (S. 360); IPCC, AR4 WGIII, Figure 1.1a (S. 103), Fig. 1.3a (S. 105).

³⁷⁷ IPCC, AR5 WGIII, 5.2.1 (S. 360).

³⁷⁸ IPCC, AR5 WGIII, Figure 1.3 (S. 123), 5.2.1 (S. 358). Siehe für die Terminologie und Zusammensetzung der halogenierten Gase oben, Kapitel 1.3.

³⁷⁹ IPCC, AR 5 WGIII, 5.2.1 (S. 360).

³⁸⁰ Siehe auch IPCC, AR5 WGIII, FAQ 11.1 (S. 869) (dort Durchschnittszahlen 2000–2010).

³⁸¹ Siehe auch IPCC, AR5 WGIII, FAQ 1.2 (S. 142). Für eine Aufteilung der Gase und Sektoren siehe IPCC, AR4 WGIII, Figure 1.1.a (S. 103), Fig. 1.3b (S. 105); United Nations Environment Programme (UNEP), Emissions Gap Report 2012, Figure 2.2.a und Figure 2.2b (S. 11).

Oder vom Standpunkt des Energieverbrauchs aus betrachtet: Im Jahr 2010 fielen gemäß der International Energy Agency 69 % aller anthropogenen Treibhausgase im Zusammenhang mit der Nutzung von Energie an (Energie- oder Wärmeerzeugung), wovon 90 % mit Kohlendioxidemissionen verbunden sind.³⁸²

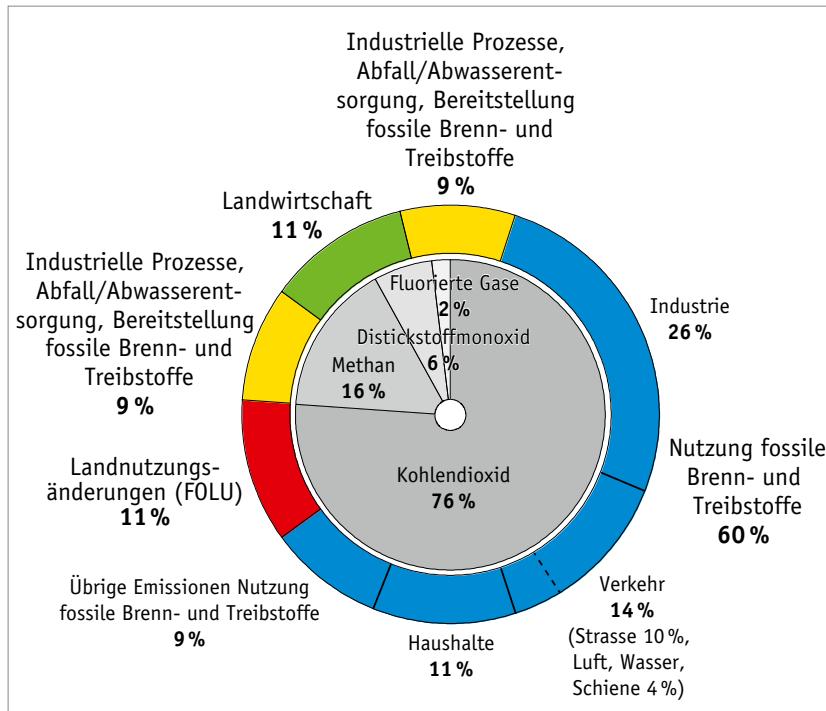


Abb. 5.5 Emissionen nach Treibhausgasen und Quellen, 2010. Der innere Ring zeigt die Verteilung der verschiedenen Treibhausgase und der äußere Ring die entsprechenden Anteile der hauptsächlichen Quellen des jeweiligen Gases. Die Nutzung fossiler Energieträger (unterteilbar in die hauptsächlichen Sektoren Industrie, Verkehr, Privathaushalte und Übrige) und die Forstwirtschaft und Landnutzungsänderung (FOLU) führen vorwiegend zu Kohlendioxidemissionen und die Landwirtschaft zu Methan- und Distickstoffmonoxidemissionen. Die Restgruppe der industriellen Prozesse etc. verteilt sich auf alle Treibhausgase und macht insgesamt etwa 18 % der Emissionen aus, wobei 9 % in Form von Methan und 9 % in Form der restlichen Gase anfallen.

382 International Energy Agency (2014b), S. 7; International Energy Agency (2014a), III.43. Die weiteren Anteile entfallen auf industrielle Prozesse (6 %), Landwirtschaft (11 %) und eine Restgruppe (14 %). Siehe für die Schweiz auch Akademien der Wissenschaften Schweiz (2016), 3.4 Energie (S. 168 ff.).