



Bernhard Lichtberger

Unser Planet im Klimawandel

Ein Handbuch über physikalische
und gesellschaftliche Zusammenhänge

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	15
2	Das System Erde und seine Kreisläufe	19
2.1	Systeme	20
2.2	Offene und geschlossene Systeme	21
2.3	Erhaltungsgrößen	22
2.4	Systemdynamik – Rückkopplung	24
2.5	Systemdynamik – Komplexität – chaotisches Verhalten	26
3	Wetter und Klima	27
3.1	Globale Klimazonen	29
3.2	Klimaveränderung	32
3.3	Die Atmosphäre	35
3.4	Das Klimasystem	36
4	Das Universum, das Sonnensystem und der Planet Erde	39
4.1	Die Entstehung des Universums und der Himmelskörper	39
4.2	Die Entstehung von Sonnensystemen	46
4.3	Unsere Galaxie und unsere Sonne	47
5	Der Planet Erde	49
5.1	Was sind Planeten?	49
5.2	Der Aufbau der Erde	51
5.3	Die Plattentektonik	53
5.4	Die Bewegungsformen der Erde	57
5.4.1	Milankovic-Zyklen	58
5.5	Geologische Zeiträume – astronomische Ausdehnungen	60
6	Die Erdgeschichte	61
6.1	Altersbestimmung	64
6.1.1	Klimaproxys	64
6.1.2	Stratigraphie	64
6.1.3	Leitfossilien	64
6.1.4	Erdmagnetfeld	65
6.1.5	Radiometrische Altersbestimmung	65
6.1.6	Sedimentablagerungen	66
6.1.7	Eiskernbohrungen	67
6.1.8	Jahresringzählungen von Bäumen	67

6.2	Messung von Ozeanwassertemperaturen der Vergangenheit	67
6.2.1	Mechanismus der $\delta^{18}\text{O}$ -Methode	68
6.2.2	Mechanismus der $\delta^2\text{H}$ -Methode	69
6.3	Fossilien	69
6.3.1	Wie entstehen Fossilien?	69
6.4	Die Entwicklung des Lebens	70
6.4.1	Was ist Leben?	70
6.5	Die Erdneuzeit	77
6.6	Die Evolution zur Entwicklung der Menschen	81
6.7	Übersicht über die Erdzeitalter	85
7	Erdphysik und Klima	87
7.1	Energieerhaltung	88
7.2	Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik	88
7.3	Die Sonne	89
7.4	Das Sonnenspektrum	92
7.5	Die Energieflussdichte der Sonne	95
7.6	Der »Treibhauseffekt«	97
7.7	Albedo – das Rückstrahlvermögen der Erde	102
7.8	Physik der Gase	103
7.8.1	Aggregatzustände	103
7.8.2	Die Zustandsgleichung »idealer« Gase	104
7.8.3	Partialdrücke in Gasgemischen	104
7.8.4	Der Luftdruck	105
	<i>7.8.4.1 Tiefdruckgebiet • 7.8.4.2 Hochdruckgebiet • 7.8.4.3 Wie entsteht Wind?</i>	
7.8.5	Die Luftfeuchtigkeit	106
7.8.6	Wie entstehen Wolken?	107
7.9	Corioliskraft	107
7.10	Planetare Windströmungen	109
7.10.1	Die Hadley-Zelle	109
7.10.2	Die Polarzelle	110
7.10.3	Die Ferrel-Zelle	111
7.10.4	Polarer Jetstream	113
7.10.5	El-Niño/El-Niña-Phänomen	114
7.11	Ozeanströmungen	117
7.11.1	Eigenschaften von Wasser	117
7.11.2	Eigenschaften von Meerwasser	118
7.11.3	Bewegung des Meerwassers	119
7.11.4	Meridionale Umwälzzirkulation	121
7.11.5	Der Golfstrom	122
7.12	Wasserkreislauf	123
7.12.1	Wo wird die Wärmeenergie auf der Erde gespeichert?	126
7.13	Sauerstoffkreislauf	127

8	Der bedrängte Planet und seine Reaktion	131
8.1	Welche Reaktionen des Erdsystems werden gegenwärtig beobachtet?	133
8.1.1	Anstieg der globalen Erdtemperatur	133
8.1.2	Das Abschmelzen der Gletscher	138
8.1.3	Das Abschmelzen der Antarktis und des grönländischen Eises	139
8.1.4	Anstieg des Meeresspiegels	142
8.1.5	Wachstum der Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre	143
8.1.6	Anstieg der Methankonzentration	145
8.1.7	Anstieg von Distickstoffoxid in der Atmosphäre	147
8.1.8	Anstieg von Schwefelhexafluorid	150
8.1.9	Der Rückgang borealer Wälder und der Regenwaldgebiete	151
8.1.10	Verlust der Arten – das sechste Massenaussterben	155
8.1.11	Die Verschiebung der Klimazonen	159
8.1.12	Die Wetterextreme nehmen zu	160
8.1.13	Umwandlung von natürlichem Land	161
9	Bedrohung der Menschheit durch den Klimawandel	163
9.1	Kippunkte des Klimasystems oder der freie Fall ins Klimachaos	166
9.1.1	Kippunkt: Auftauen der Permafrostböden	169
9.1.2	Kippunkt: Der Bakterienstoffwechsel im Ozean	170
9.1.3	Kippunkt: Absterben der Amazonas-Regenwälder	170
9.1.4	Kippunkt: Absterben nördlicher borealer Nadelwälder	172
9.1.5	Kippunkt: Auflösung von Stratokumulus-Wolken	172
9.2	Das Konzept der Strahlungsantriebe	173
9.2.1	Strahlungsantrieb durch Treibhausgase	178
	9.2.1.1 Strahlungsantrieb CO ₂ • 9.2.1.2 Strahlungsantriebe Methan, Lachgas, FCKW und halogenisierte Verbindungen • 9.2.1.3 Berechnung der Strahlungsantriebe der wichtigsten Treibhausgase	
9.2.2	Strahlungsantrieb: Aerosole	182
	9.2.2.1 Strahlungsantrieb: Kondensstreifen und kondensstreifeninduzierte Trübung • 9.2.2.2 Strahlungsantrieb stratosphärische Aerosole	
9.2.3	Strahlungsantrieb Albedo-Veränderungen durch Landnutzung und Landbedeckungswechsel	184
9.2.4	Solarer Strahlungsantrieb	185
9.2.5	Gesamter natürlicher und anthropogener Strahlungsantrieb	186
9.2.6	Die Auswirkung der Strahlungsantriebe auf das Erdklima	188
	9.2.6.1 Schnell wirkende Klimareaktion • 9.2.6.2 Berechnung der Effektivität der Klimastörung durch eine Veränderung der Konzentration der Treibhausgase • 9.2.6.3 Langsam wirkende Klimareaktion	
9.3	Ursprung und Verursacher des Treibhausgases CO ₂	192
9.3.1	CO ₂ – und globaler Kohlenstoffkreislauf	192
	9.3.1.1 Globaler Kohlenstoffhaushalt	
9.3.2	Kohlenstoffemissionen	196
9.3.3	Globale Emissionen von Treibhausgasen nach Wirtschaftssektoren	197
9.3.4	CO ₂ -Emissionen durch Verkehrsträger	198
9.3.5	CO ₂ -Emissionen durch Zementproduktion	199
9.3.6	CO ₂ -Emissionen aus Land- und Forstwirtschaft und anderer Landnutzung	200

9.3.7	CO ₂ -Emission aus der Gewinnung elektrischer Energie aus fossilen Brennstoffen	200
9.3.8	Fossiler Brennstoff Kohle	203
9.3.9	Fossiler Brennstoff Erdöl	205
9.3.10	Globale Emissionen von Treibhausgasen, aus fossilen Brennstoffen stammend, nach Herkunftsländern	205
9.3.11	Spitzenverbraucher/Einwohner	207
9.3.12	Weltweit größte Förderer und Verbraucher fossiler Brennstoffe	208
10	Bedrohungen der Umwelt durch den Menschen	211
10.1	Die schleichende Vergiftung des Menschen und seiner Umwelt	211
10.1.1	Schadstoffquellen in der Umwelt	213
	<i>10.1.1.1 Metalle und Metalloide • 10.1.1.2 Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe • 10.1.1.3 Industrielle Chemikalien • 10.1.1.4 Pharmazeutika und Körperpflegeprodukte • 10.1.1.5 Radioaktive Elemente • 10.1.1.6 Elektronischer Abfall • 10.1.1.7 Kunststoffe • 10.1.1.8 Nanopartikel • 10.1.1.9 Natürliche Toxine in Lebensmitteln</i>	
10.2	Die Plastifizierung der Welt	217
10.2.1	Gefahren des Kunststoffs und des Mikroplastiks	221
10.2.2	Welche Gefahren bergen die Zusatzstoffe des Plastiks in sich?	222
10.2.3	Die größten Produzenten von Plastik	224
10.3	Die Bevölkerungsexplosion	225
10.3.1	Migrationsbewegungen	228
10.3.2	Das Leben in den Städten	230
10.4	Verschiebung der Vegetationszonen	232
10.5	Die Gefahr von Hungersnöten durch den Rückgang der Nahrungsmittelproduktion	232
10.6	Bedrohung: der atomare Krieg	237
10.7	Bedrohung: die gentechnische Versuchung	240
10.7.1	Risiken, verbunden mit gentechnisch veränderten Organismen	241
10.7.2	Risiken, verbunden mit möglicher ökologischer Instabilität	242
10.8	Bedrohung: die Entmenschlichung durch Digitalisierung	243
10.8.1	Die GAFAM-Oligopole	244
10.8.2	Datenschutzprobleme	247
10.8.3	Die Gefahr von Monopolen	247
10.8.4	Die Gefahr der Manipulation der öffentlichen Meinung	248
10.8.5	Droht eine Übernahme der Welt durch die KI?	248
11	Was unternimmt die Menschheit gegen die existenzielle Bedrohung durch den Klimawandel und seine Folgen?	249
11.1	Wer verursacht die beobachteten Reaktionen des Klimasystems?	250
11.2	Warnungen der Wissenschaft	252
11.3	Berichte und Konferenz der UNO – IPCC	253
11.3.1	Warum wurde im Paris-Protokoll genau 2 °C als Grenzwert gewählt?	254
11.3.2	Ein kurzer historischer Überblick über die bisherigen Klimakonferenzen	256
11.4	Voraussagen des Klimas (IPCC 1990) und tatsächlicher Verlauf bis 2020	258

11.5	Erfolge, Teilerfolge und Misserfolge der Welt im Kampf gegen Umweltprobleme	259
11.5.1	Das Ozonloch schließt sich – ein Erfolg internationaler Zusammenarbeit	259
11.5.2	Die Gewässerverschmutzung	261
11.5.3	Der Rückgang der Luftschadstoffe	262
12	Warum passiert nichts oder: »Alles, was geschieht, ist zu wenig!«	267
12.1	Die Geschichte der Technik oder: Die vergiftete Frucht der Erkenntnis	267
12.2	Der reale Klimawandel und die empfundene Bedrohung	270
12.3	Der Neoliberalismus als Beschleuniger des Klimawandels	273
12.3.1	Der Neoliberalismus erobert die Welt	275
12.3.2	Die Schwächung des Sozialstaats	278
12.3.3	Die Ausbeutung der Entwicklungsländer durch den Neoliberalismus	279
12.3.4	Die Aushöhlung demokratischer Regierungsformen durch den Neoliberalismus	280
12.3.5	Die neoliberalen Antriebskräfte des Klimawandels	282
12.4	»Nachhaltigkeit« und Menschenrechte	285
12.4.1	»Global Compact« der United Nations	285
	12.4.1.1 <i>Bluwashing</i> • 12.4.1.2 <i>Greenwashing</i>	
12.4.2	Zeitigt der Global Compact Erfolge?	286
12.4.3	OECD-Leitsätze für multinationale Unternehmen	287
12.4.4	EU-Grünbuch »Europäische Rahmenbedingungen für die soziale Verantwortung der Unternehmen der EU«	288
12.5	Das Märchen von der nachhaltigen Produktion	288
12.5.1	Aluminium Stewardship Initiative (ASI)	289
12.5.2	Global Roundtable on Sustainable Beef (GRSB)	291
12.5.3	Roundtable on Responsible Soy (RTRS)	294
12.5.4	Roundtable on Sustainable Palm Oil (RSPO)	296
	12.5.4.1 <i>Unilever</i> • 12.5.4.2 <i>Cargill</i> • 12.5.4.3 <i>Wilmar International</i>	
12.5.5	Better Cotton Initiative (BCI)	300
12.6	Das Versagen der Medien	304
12.6.1	Wem gehören die Medien?	304
12.6.2	Welche Inhalte verbreiten die neuen Medien?	305
12.7	Die Nichtnutzung der Vorteile der Gendergerechtigkeit	306
12.8	Die Verleugnung externer Kosten oder das Prinzip »Nach uns die Sintflut«	309
12.8.1	Umweltschädigungskosten – Kostensätze	309
12.8.2	Das EU-Emissionshandelssystem	312
13	Was muss zur Rettung der Menschheit geschehen? Was können wir tun?	313
13.1	Der Planet ist krank	314
13.2	Vitalparameter der »gesunden« Erde	314
13.3	Vitalparameter: Weltbevölkerung	315
13.3.1	Die »optimale« Größe der Weltbevölkerung	316

13.4	Vitalparameter: Treibhausgasemissionen	317
13.4.1	Auswirkungen des CO ₂ -Anstiegs auf die Pflanzenwelt	318
13.5	Vitalparameter: Biodiversität	319
13.6	Aktuelle Fahrpläne zur Dekarbonisierung: Sind sie die Rettung?	321
13.6.1	Das Übereinkommen von Paris	321
13.7	Warum sind die derzeitigen Fahrpläne nicht ausreichend?	325
13.8	Wie stehen die Chancen, die Pariser Klimaziele doch noch zu erreichen?	326
13.9	Energieversorgung aus erneuerbaren Energien	328
13.9.1	Energieeinsparung durch WWS-Energieformen	329
13.9.2	Kostenvergleich zwischen WWS und BAU	330
13.9.3	Ein Fahrplan zur schnellen Dekarbonisierung bis 2050	332
13.10	Gewinnung erneuerbarer Energie	335
13.10.1	Gewinnung elektrischer Energie aus Kernkraftwerken	335
13.10.2	Geothermiekraftwerke	336
13.10.3	Parabolrinnenkraftwerke	337
13.10.4	Photovoltaikkraftwerke und -anlagen	338
13.10.5	Wasserkraftwerke	339
13.10.6	Wellenkraftwerke	340
13.10.7	Meeresströmungskraftwerke	340
13.10.8	Windkraftanlagen zur Stromgewinnung	341
13.10.9	Biogasanlagen	342
13.10.10	Energieträger Wasserstoff	343
13.10.11	Die Brennstoffzelle	343
13.10.12	Vergleich der verschiedenen Energieerzeugungsanlagen	344
13.10.13	Prognose der Leistungsentwicklung erneuerbarer Energieformen	345
13.11	Begleitmaßnahmen auf dem Weg zu einer nachhaltigen Dekarbonisierung	346
13.11.1	Landwirtschaftliche Betriebe	346
13.11.2	Lebensmittelfülle und Lebensmittelabfälle	347
13.11.3	Das gesunde Essen und reduzierter Fleischkonsum	347
13.11.4	Reduktion von Distickoxid N ₂ O	351
13.11.5	Reduktion von Methan	353
13.11.6	Nachhaltiger Verkehr und Transport	354
	<i>13.11.6.1 Ist das Elektroauto die Antwort auf die Klimakrise?</i>	
13.11.7	Eine CO ₂ -Steuer für eine Trendwende	359
13.11.8	Reduktion des Energieverbrauchs in Haushalten	360
	<i>13.11.8.1 Energiesparen beim Heizen • 13.11.8.2 Wärmepumpen • 13.11.8.3 Solarthermie • 13.11.8.4 Photovoltaik zur eigenen Stromgewinnung • 13.11.8.5 Hausdämmungsmaßnahmen</i>	
13.11.9	Alternative Baustoffe	366
	<i>13.11.9.1 Kohlenstoffarme Zementherstellung • 13.11.9.2 Alternative Baustoffe für Gebäude</i>	
13.11.10	Steigerung der Biodiversität	370
	<i>13.11.10.1 Wert pflanzengenetischer Ressourcen • 13.11.10.2 Süßwasser-ökosysteme</i>	
13.12	Stärkung demokratischer Regierungsformen	375
13.12.1	Eine neue Gesellschaft im Wertewandel	378
13.12.2	Unverhältnismäßigkeit der Vermögen verringern	378

13.12.3	Bedingungsloses Grundeinkommen	379
13.12.4	Stärkung des Sozialstaates	380
13.12.5	Startkapital für alle	381
13.12.6	Wirtschaftswachstum oder Gesundenschumpfung?	381
13.12.7	Mehr Demokratie für alle	381
13.12.8	Nachhaltiger Konsum	383
13.12.9	Objektive öffentliche Medien und Medienförderung	383
13.12.10	Was kann der Einzelne tun?	384
13.12.11	Was sollen die Regierungen tun?	387
14	Wenn nichts mehr hilft: Geoengineering oder Notmaßnahmen	389
14.1	Methoden des künstlichen Abbaus von CO ₂ aus der Atmosphäre	392
14.1.1	Aufforstung und Wiederaufforstung von Wäldern	392
14.1.2	Renaturierung von Mooren und Feuchtgebieten	394
14.1.3	CO ₂ -Filterung und -Abscheidung im Boden	394
14.1.4	Der Ozean als Helfer	395
14.1.5	Ozeandüngung	396
14.1.6	Bioenergiegewinnung, kombiniert mit Kohlenstoffabscheidung und -speicherung	397
14.1.7	CO ₂ -Abscheidung durch Mikroalgen	398
14.1.8	DACC-Abscheidung von CO ₂ über Filter und Chemie und Speicherung	398
14.1.9	Düngen mit Biokohle (BC)	399
14.1.10	Verwitterung von Mineralien	399
14.1.11	Kohlenstoffabscheidung und -verwertung (CCU)	400
14.1.12	Vergleich von CDR-Technologien	400
14.1.13	Zusatznutzen von CDR-Methoden	401
14.1.14	Kohlenstoffbindung im Boden	402
14.2	Methoden zur Reduktion des Strahlungsantriebs	403
14.2.1	Einbringen von Aerosolen in die Stratosphäre	403
14.2.2	Aufhellen von Wolken über dem Meer	403
14.2.3	Erhöhung der Albedo	404
14.3	Risiken des Geoengineering	404
14.4	Methanabscheidung – kurzfristiger Helfer in der Not	405
15	Umweltschutzorganisationen	407
15.1	Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)	407
15.2	International Union for Conservation of Nature (IUCN)	408
15.3	United Nations Environment Program (UNEP)	409
15.4	Earth System Governance Project	409
15.5	Global Environment Facility (GEF)	410
15.6	European Environment Agency (EEA)	411
15.7	Das Projekt zur Offenlegung von CO ₂ -Emissionen (Carbon Disclosure Project – CDP)	411
15.8	Greenpeace	412
15.9	World Wildlife Fund for Nature (WWF)	414
15.10	Global 2000	414

15.11	Rain Forest Action Network (RAN)	415
15.12	Friends of the Earth International (FoE)	416
15.13	Fridays for Future & School Strike for Climate	417
15.14	Extinction Rebellion	418
15.15	Global Footprint Network (GFN)	419
15.16	Oxfam	420
15.17	Union of Concerned Scientists (UCS)	421
16	Empfohlene weiterführende Literatur und Links	423
16.1	Empfohlene Literatur	423
16.2	Empfohlene Links	424
17	Konstanten und Konvertierung	427
18	Abkürzungen	429
19	Quellenverzeichnis für Abbildungen	433
20	Quellenverzeichnis für Tabellen	445
21	Index	449

Bedrohung der Menschheit durch den Klimawandel

Wie bedroht der Klimawandel die Menschheit?
 Was sind Kippunkte, und worin besteht deren Gefahr?
 Was sind Strahlungsantriebe, und wodurch werden sie verursacht?
 Wer und was verursacht die Treibhausgase?

Das Pew Research Center stellt sich die Aufgabe, die Öffentlichkeit unparteiisch über Themen, Einstellungen und Trends zu informieren, die die Welt prägen.⁴¹ Bei einer Umfrage in 26 Ländern im Frühjahr 2018 nannte die Mehrzahl in 13 Ländern den

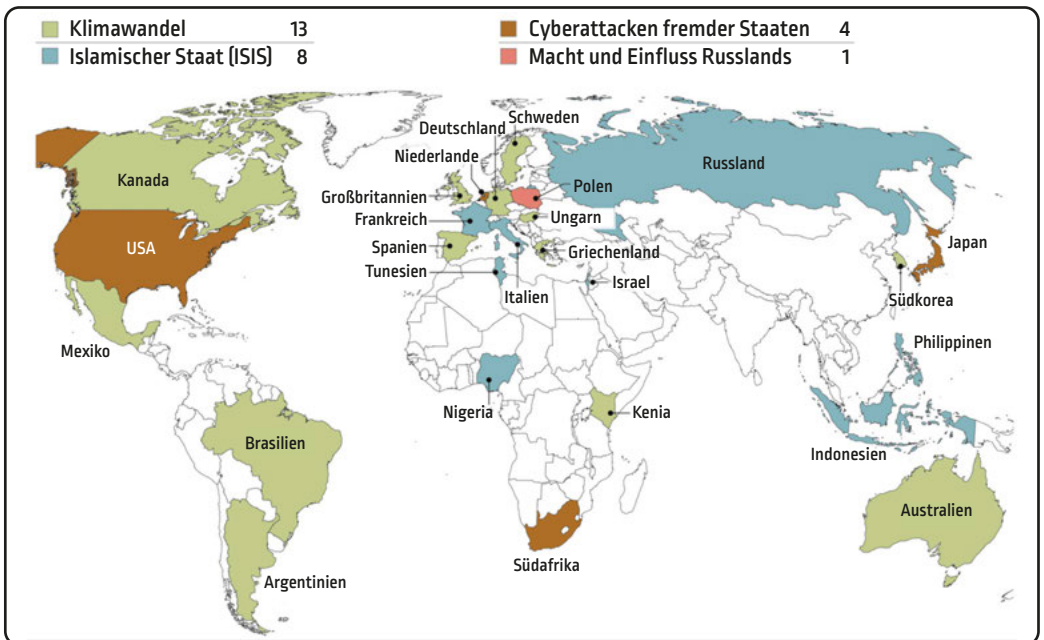


Abbildung 102: Länder mit befragten Einwohnern nach der größten Bedrohung.

⁴¹ Pew Research Center; www.pewresearch.org, abgerufen am 15.1.2020.

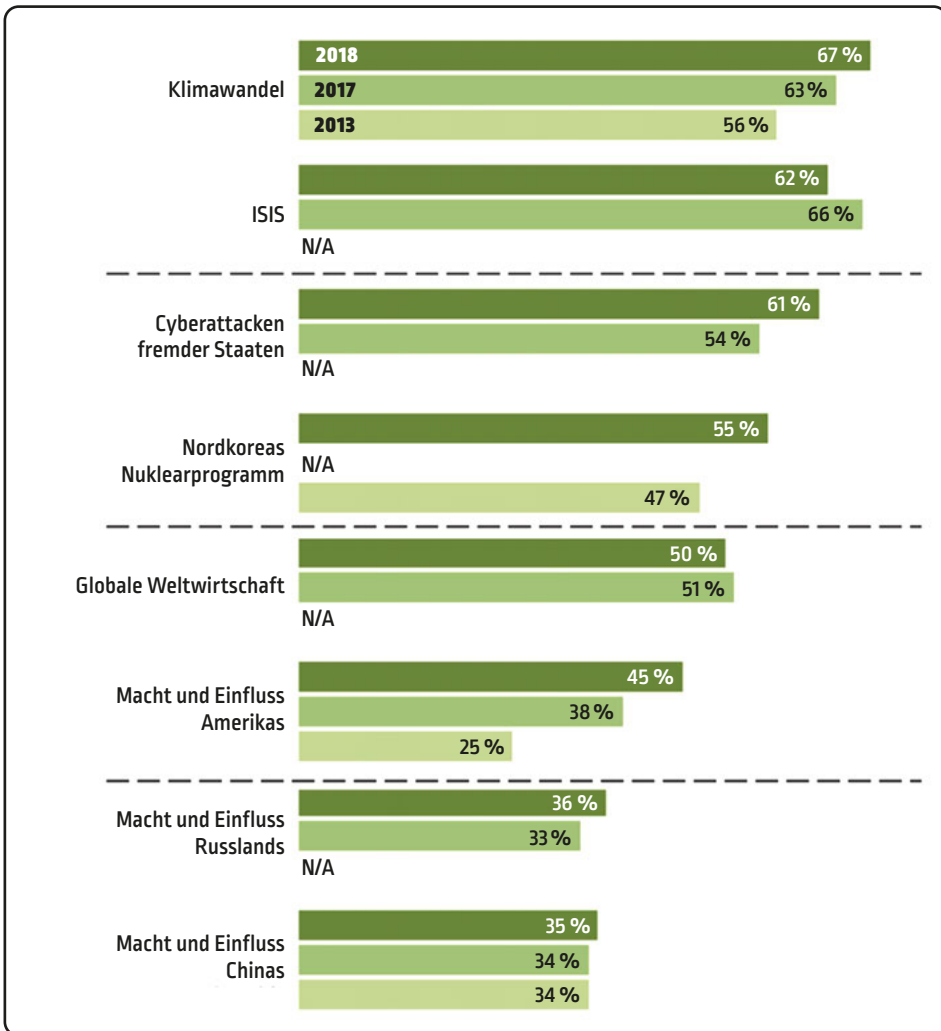


Abbildung 103: Länder mit befragten Einwohnern nach der größten Bedrohung [in den USA und Russland wurde nicht nach der Bedrohung durch die eigene Macht und den eigenen Einfluss gefragt].

Klimawandel als größte Bedrohung. In acht Staaten wurde der Islamische Staat ISIS als größte Bedrohung empfunden, gefolgt von der Bedrohung durch Cyberattacken fremder Staaten. Polnische Bürger sahen in Russland die größte Bedrohung.

Bei einigen der acht Fragen, die zur internationalen Bedrohung in der Umfrage 2018 gestellt wurden, gab es über die Jahre erhebliche Veränderungen. Im Jahr 2013, noch vor der Unterzeichnung des Pariser Klimaabkommens, sahen bereits 56 % der befragten Länder den globalen Klimawandel als eine große Bedrohung an. Im Jahr 2017 stieg dieser Wert auf 63 %, und 2018 lag er bei 67 %. Seit 2013 nahm die Sorge um

die Klimabedrohung in 13 der Länder, für die Daten vorliegen, deutlich zu. Die größten Zuwächse gab es in Frankreich (plus 29 %) und Mexiko (plus 28 %), aber auch in den USA, Großbritannien, Deutschland, Spanien, Kenia, Kanada, Südafrika und Polen gab es zweistellige Prozentpunktezuwächse.

Es ist interessant, dass ein atomarer Krieg von der Mehrheit nicht als sonderlich bedrohend empfunden wird. Vermutlich würde eine aktuelle Umfrage nach den Erfahrungen mit dem Coronavirus SARS-CoV-2 eine Spitzenreihung für die Angst vor Pandemien erbringen.

Diese Umfragedaten zeigen, dass der Weltbevölkerung zunehmend die Gefahr durch den Klimawandel bewusst wird. Zur Zeit der Verfassung dieses Manuskripts tobten in Australien Buschfeuer in bisher nicht bekanntem Ausmaß.



Abbildung 104: Waldbrände in Nordkalifornien, fotografiert von der ISS-Raumstation.

Das Foto (Abbildung 104), aufgenommen aus der Internationalen Raumstation ISS, zeigt die verheerenden Waldbrände in Nordkalifornien. Ein Hitzerekordjahr folgt auf das nächste. Überschwemmungen und Dürren sind an der Tagesordnung. Entfesselte Stürme nehmen an Stärke zu. Regelmäßig berichten Medien über den Klimawandel. Die Zivilgesellschaft formiert sich, vor allem durch Jugendliche, die regelmäßig gegen das Verheizen ihrer Zukunft demonstrieren – »Fridays for Future«. Menschen sind – zu Recht – verunsichert.

9.1 Kipppunkte des Klimasystems oder der freie Fall ins Klimachaos

Wissenschaftler, die sich mit der Klimaforschung und deren komplizierten Regelkreisen mit vielfältigen Mit- und Gegenkopplungen beschäftigen, befürchten das Auftreten von Kipppunkten (engl.: tipping points). Wenn die Treibhausgase weiter steigen, könnte ein kritischer Zustand erreicht werden, ab welchem das System durch die auftretenden Mitkopplungen – z. B. durch das Abschmelzen der Polkappen – eine drastische Veränderung der Wolkenbildung und deren kühlende Wirkung »ganz von selbst« in Richtung einer »Heiße Erde« kippt. Das Treibhausklima würde zum Heißhausklima, und zwar auf Jahrtausende ohne Chance auf Umkehr. Eiszeitzyklen dauern 100.000 Jahre. Eine vereiste Erde verharrt lange in diesem Zustand, ehe sie sich

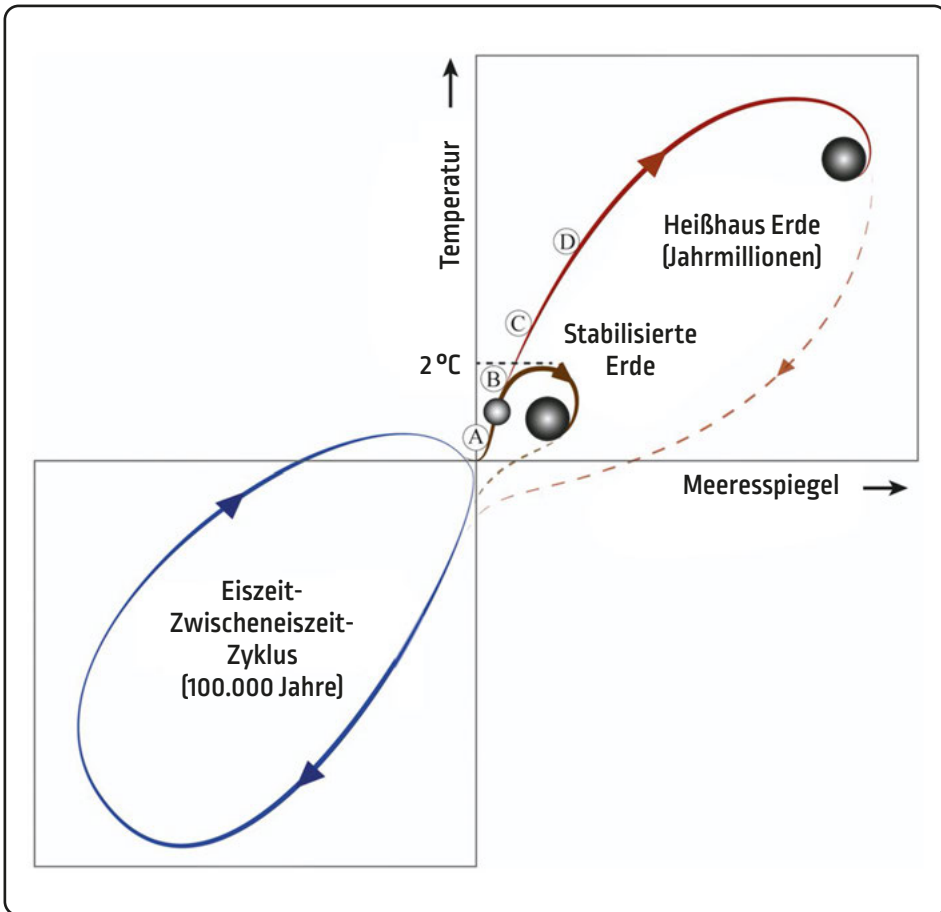


Abbildung 105: Schematische Darstellung verschiedener möglicher Klimaverläufe.

wieder erwärmt und eine Zwischeneiszeit erlebt – ähnlich jener, in welcher sich die Erde gerade befindet.

Abbildung 105 zeigt die Erde schematisch in einer Eiszeit (linke blaue Verlaufskurve). Die Nulllinie der Temperatur ist die Erdtemperatur vor der Industrialisierung. Der Grenzwert von 2 °C (strichlierte Marke auf der Y-Achse) ist ebenfalls eingetragen. Kann die Menschheit diesen nicht einhalten, wird die Erde den roten Pfad einschlagen. Die Großbuchstaben bedeuten:

- A** Zustand der Erde im Mittelholozän (6.500 Jahre, 260 Parts per million CO₂, 0,8 °C),
- B** Zustand in der Eem-Warmzeit (125.000 Jahre, 300 Parts per million CO₂, 1,3 °C, 7 Meter Meeresspiegelanstieg),
- C** Zustand im Mittelpliozän (3,5 Millionen Jahre, 430 Parts per million CO₂, 2,5 °C, 15 Meter Meeresspiegelanstieg) und
- D** Zustand im Mittelmiozän (16 Millionen Jahre, 500 Parts per million CO₂, 4,5 °C, 40 Meter Meeresspiegelanstieg).

Gegenwärtig weist die Erde >410 Parts per million CO₂ und >1 °C auf, wobei sich die Temperatur, der CO₂-Gehalt und der Meeresspiegel in jedem Fall weiter erhöhen werden. Die gesellschaftlichen und technologischen Entwicklungen der nächsten ein bis zwei Jahrzehnte sind von entscheidender Bedeutung für das Erdsystem der nächsten zehn- bis hunderttausend Jahre.⁴²

Im Diagramm eingetragen ist neben der Lufttemperatur auch der Meeresspiegel, der davon abhängig beträchtlich schwankt. In Eiszeiten sinkt der Meeresspiegel deutlich, und in Warmzeiten steigt er. Da die meisten Küstenstädte nur bis 10 Meter über Wasserspiegel liegen und in Küstennähe viele Menschen leben, wird die Dramatik einer Warmzeit mit einer Temperaturerhöhung von mehr als 2 °C richtig greifbar. So schnelle Anstiegsraten des CO₂-Gehalts und der Erdtemperatur traten in der paläologischen Vergangenheit nur nach Naturkatastrophen auf – wie die ungeheuren Magmaausstritte am Ende des Perms in Sibirien mit einem Aussterben von 96 % aller Meereslebewesen. Durch die Lethargie der Politik und das »Business as usual« scheint eine deutliche Überschreitung des 2-°C-Zieles mittlerweile immer wahrscheinlicher, ein Anstieg des Meeresspiegels um mehr als 10 Meter ist auf lange Sicht geradezu unvermeidlich.

Einige wenige der mit den Rückkopplungen verbundenen Veränderungen können innerhalb kurzer Zeiträume (50 bis 100 Jahre) rückgängig gemacht werden. Die bedrohlichen lebensgefährdenden Mechanismen, wie das Auftauen des Permafrosts und die Freisetzung des gesamten dort gebundenen Kohlenstoffes, sind innerhalb menschlicher Zeiträume nicht mehr umzukehren. Die Umwandlung großer Gebiete, wie des Amazonas-Regenwaldes in eine Savanne, ist ein weiteres Beispiel für einen

⁴² Nach: Steffen, W.; et al. (2018): Trajectories of the Earth System in the Anthropocene; PNAS Vol. 115, No. 13; <https://doi.org/10.1073/pnas.1810141115>, abgerufen am 16.1.2020.

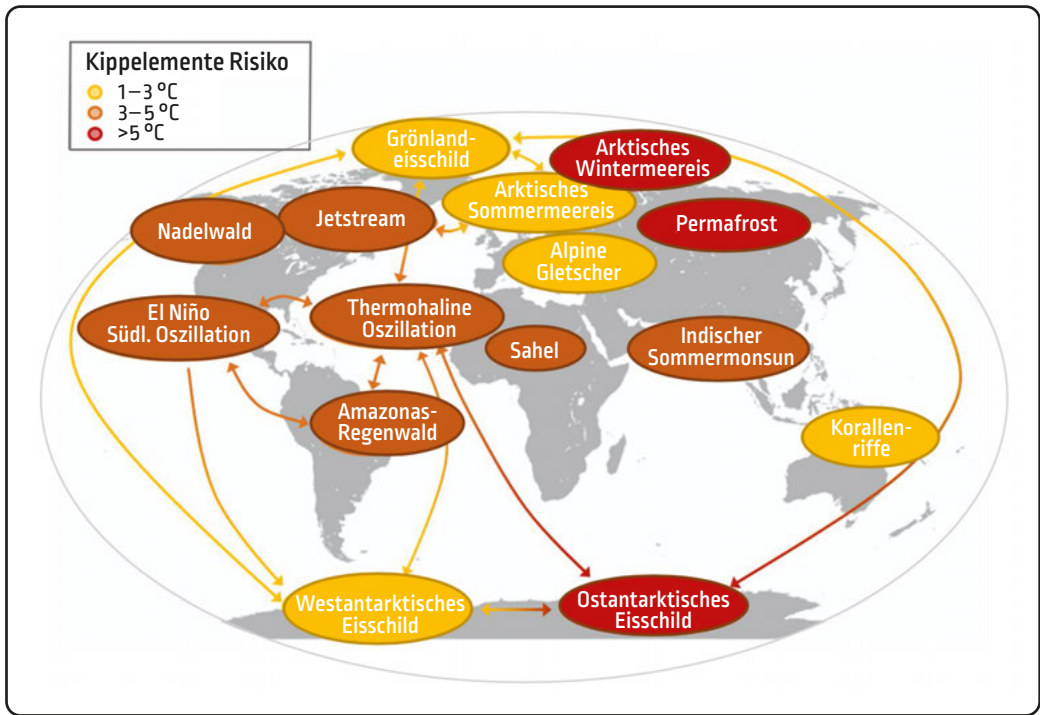


Abbildung 106: Mögliche Kippkaskaden.

befürchteten Kippunkt. Weitere sind: die Zersetzung von Methanhydraten im Ozean, stärkere Bakterienatmung im Meer, der Verlust der Eisschilde, begleitet von einem Anstieg des Meeresspiegels mit einer möglichen Verstärkung durch Veränderung der Ozeanzirkulation. Kippeffekte können zu einem über Jahrhunderte bis Jahrtausende andauernden Rückkopplungseffekt führen. Ist ein Kippunkt überschritten, kann der Mensch die eintretenden Folgen nicht mehr abwenden – er gleicht einem Schwimmer in der Donau, der mit bloßen Händen den Strom aufhalten will.

Die einzelnen Kippelemente sind je nach den geschätzten Kipptemperaturen farblich im Diagramm gekennzeichnet. Pfeile zeigen die Wechselwirkungen zwischen den Kippelementen an, die Kaskaden erzeugen können.

Es ist von immenser Wichtigkeit, das Erdsystem unter ähnlichen Bedingungen der letzten 12.000 Jahre zu halten (max. +2 °C). Das kann nur durch eine tiefe Senkung der Treibhausgasemissionen, den Schutz und die Verbesserung der biosphärischen Kohlenstoffsenken und zusätzliche Maßnahmen zur Entfernung von CO₂ aus der Atmosphäre erfolgen. Eine Anpassung der Lebensumstände der Menschen und der landwirtschaftlichen Produktion an die klimatischen Bedingungen sind ebenfalls zwingend notwendig.

Tabelle 12 zeigt die wichtigsten Rückkopplungsmechanismen und ihr Zeitverhalten, die zu einem Kippen des Erdsystems führen könnten.

Table 12: Biogeophysikalische Rückkopplungen des Erdsystems, die als Kippelemente den Weg in eine Heißhauserde beschleunigen können (1.000 Gigatonnen C -2°C).

Rückkopplung	Antrieb \rightarrow Abschätzung Rückkopplungsstärke	Stärke Rückkopplung [$^{\circ}\text{C}$ und Gt C bis 2100]	Reaktionsgeschwindigkeit des Erdsystems
Auftauen des Permafrosts und Freisetzung CO_2 und CH_4	-2°C	45 Gt C $0,09^{\circ}\text{C}$	Geschätzte Rückkopplung spürbar ab 2100
Freisetzung CH_4 aus Ozean	-2 bis $6,5^{\circ}\text{C}$	Vernachlässigbar bis 2100	Allmähliche langsame Freisetzung auf tausendjährigen Zeitskalen ergeben $0,4$ bis $0,5^{\circ}\text{C}$ Rückkopplung
Schwächung der C-Senken an Land und im Ozean	-2°C	Relative Abschwächung der Senken um $0,25^{\circ}\text{C}$	Geschätzte Rückkopplung spürbar ab 2100
Erhöhte bakterielle Atmung, Freiwerden von CO_2	-2°C	12 Gt C $0,02^{\circ}\text{C}$	Geschätzte Rückkopplung spürbar ab 2100
Absterben der Amazonas-Regenwälder	2°C Kippunkt vielleicht zwischen 3 und 5°C	25 Gt C $0,05^{\circ}\text{C}$	Geschätzte Rückkopplung spürbar ab 2100
Sterben borealer Nadelwälder	2°C Kippunkt vielleicht zwischen 3 und 5°C	30 Gt C $0,06^{\circ}\text{C}$	Geschätzte Rückkopplung spürbar ab 2100
Arktischer Sommermeereisverlust	Kippunkt vielleicht zwischen 1 und 3°C	Verstärkung polare Temperatur um Faktor -2	Schnell, wahrscheinlich eisfreier Ozean im Sommer bis 2040/50
Antarktischer Sommermeereisverlust		Vermutlich geringere Rückkopplung als Arktis	Geschätzter Verlust 30% bis 2100
Verlust der polaren Eisdecke	1 bis 3°C	3 bis 5 m Meereshöhenanstieg durch Abschmelzen westantarktisches; bis zu 7 m durch grönländisches; bis 12 m durch ostantarktisches Eis	Jahrhunderte bis Jahrtausende

9.1.1 Kippunkt: Auftauen der Permafrostböden

Die Permafrostböden beginnen bereits aufzutauen. Über die Menge des freigesetzten CO_2 und Methans bis 2100 herrschen noch Unstimmigkeiten in der Forschung. Die Angabe von einer Abgabe von 45 Gigatonnen Kohlenstoff in den Kohlenstoffkreislauf beruht auf jüngeren wissenschaftlichen Arbeiten.

9.1.2 Kipppunkt: Der Bakterienstoffwechsel im Ozean

Der Ozean stellt eine Kohlenstoffpumpe dar, die im Wesentlichen auf zwei Mechanismen beruht. Einer davon ist ein anorganischer chemischer, bei dem das Oberflächenwasser der Ozeane CO_2 aus der Atmosphäre aufnimmt und durch eine chemische Reaktion als Karbonate und Bikarbonate bindet. Damit versauern Ozeane, und die Lebenswelt der marinen Lebewesen wird nachteilig beeinflusst. Der zweite Mechanismus entspricht einer biologischen Pumpe.

An der Basis aller Nahrungsketten im Meer steht das Plankton, ein Gemisch aus Bakterien, Viren, pflanzlichen und tierischen Einzellern. Circa die Hälfte der Photosyntheseleistung der Erde vollbringt das Plankton. Sein Stoffwechsel bindet Kohlenstoff und setzt Sauerstoff frei. Der Kohlenstoff des gefressenen Planktons wird durch die Meerestiere teilweise in Knochen, Muschel- oder Schneckenschalen eingebaut. Nach dem Absterben sinkt der mineralisierte Kohlenstoff ab und lagert sich in den Tiefen der Meere dauerhaft ab. Die organischen Überreste werden nach oben getrieben, zersetzt und dem globalen Kohlenstoffkreislauf wieder einverleibt. Teile des Kohlenstoffs werden dabei wieder remineralisiert. Somit sind die Remineralisierungsraten des organischen Kohlenstoffes ein kritischer Bestandteil der biologischen Pumpe.⁴³ Diese wird durch die Durchmischung des Tiefen- mit dem Oberflächenwasser und den Umweltbedingungen reguliert.

Die mikrobielle Stoffwechselaktivität ist ebenfalls von der Temperatur abhängig. Mikroben aus kälteren Meeresregionen scheinen genetisch auf die kälteren Umgebungen spezialisiert und daher weniger anpassungsfähig zu sein. Eine Erwärmung der kälteren Meeresregionen lässt einen starken Einfluss auf die Fischvorkommen und damit die Nahrungskette, an dessen Ende der Mensch steht, erwarten.

9.1.3 Kipppunkt: Absterben der Amazonas-Regenwälder

Bei einer globalen Erwärmung von 2°C wird ein Absterben von 40 % des Amazonas-Regenwaldes erwartet.⁴⁴ Innerhalb eines Jahrzehnts ging die Amazonas-Kohlenstoffsenke um 30 % zurück (von 0,54 auf 0,38 Gigatonnen Kohlenstoff pro Jahr).

Tropischer und subtropischer Wald speichern die größte Menge an Kohlenstoff, gefolgt von den nördlichen borealen Nadelwäldern. Die letzte Spalte der Tabelle 14 zeigt, dass die tropischen und subtropischen Wälder Kohlenstoff, bezogen auf die benötigte Fläche, mit Abstand am effizientesten speichern. Die Abholzung der Amazonas-Regenwälder kann in der Folge eine Kette von Reaktionen – Schwächung der

⁴³ Bendtsen, J.; et al. (2015): Analysis of remineralization, lability, temperature sensitivity and structural composition of organic matter from the upper ocean; *Progress in Oceanography* 130; <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2014.10.009>, abgerufen am 18.1.2020.

⁴⁴ Jones, C.; et al.: Committed terrestrial ecosystem changes due to climate change, *Nature Geoscience* 2 (2009); <https://doi.org/10.1038/ngeo555>, abgerufen am 18.1.2020.

Tabelle 13: In Biomen gespeicherter Kohlenstoff.

Biom	Gespeicherter Kohlenstoff [Gt]	Fläche des Bioms (Mio. km ²)	Gespeicherter Kohlenstoff [Gt C/Mio. km ²]
Tropischer/subtropischer Wald	548	20	27
Tropisches/subtropisches Grasland/Savanne	285	16	17
Wüste/trockenes Strauchland	178	25	7
Grasland/Savanne in gemäßigter Zone	184	15	13
Wald in gemäßigter Zone	315	20	15
Nördliche (boreale) Nadelwälder	348	19	18
Tundra	155	17	9

Niederschlagsysteme, Umwandlung der Wälder in Savannengebiete, Mängel bei der Wasserversorgung großer Städte (wie São Paulo) und Abnahme der Ernteerträge in den Ausläufern der Anden – auslösen.

In den 1990er- und frühen 2000er-Jahren nahmen die Regenwälder etwa 15 % der menschlichen Kohlendioxidemissionen auf. Abbildung 107 zeigt das Ergebnis einer Untersuchung von 244 intakten Regenwäldern aus 11 afrikanischen Ländern und vergleicht diese mit 321 Parzellen aus Amazonien. Die gesünderen afrikanischen Regenwälder nehmen relativ konstant 0,66 Tonnen Kohlenstoff je Hektar auf. Langfristig zeigt sich im Vergleich dazu ein Rückgang der Kohlenstoffaufnahme der

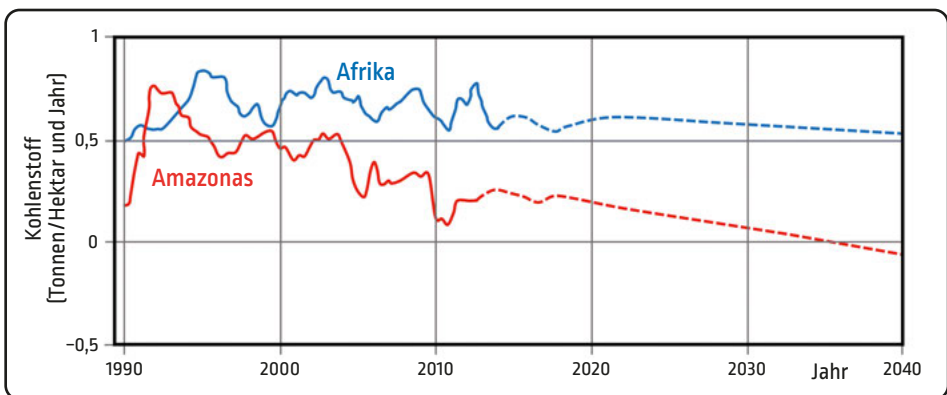


Abbildung 107: Rückgang der Fähigkeit der Regenwälder, Kohlenstoff aufzunehmen (ausgezogene Linie: Messung; strichlierte Linie: statistische Berechnung).

Regenwälder Amazoniens. Beide weisen ein zunehmendes Baumwachstum auf (entsprechend dem erwarteten Anstieg durch die wachsende CO₂-Konzentration), diesem wirken die steigende Temperatur und die damit verbundenen Dürren und der klimatische Stress durch eine höhere Baumsterblichkeit entgegen. Auch in Afrika ist ein langsamer Rückgang der Kohlenstoffsенке zu beobachten.

9.1.4 Kippunkt: Absterben nördlicher borealer Nadelwälder

Die kanadischen Wälder zeigten in der Zeit von 1920 bis 1970 einen Anstieg der Kohlenstoffspeicherung, gefolgt von einem Rückgang, der bis heute andauert, als Folge einer insektenbedingten Baumsterblichkeit, vermehrten Waldbränden und dem sich erwärmenden Klima. Der kanadische Wald macht in seinem Bestand etwa ein Drittel der borealen nördlichen Nadelwälder aus. Zwischen 1986 und 2016 wurden 17 % der europäischen Waldfläche durch natürliche und/oder menschliche Einflüsse geschädigt.⁴⁵

9.1.5 Kippunkt: Auflösung von Stratokumulus-Wolken

Stratokumuluswolken bedecken 20 % der Ozeane in den niedrigen Breitengraden und sind besonders in den Subtropen weit verbreitet. Sie kühlen die Erde, weil sie große Teile ihrer Oberfläche vom Sonnenlicht abschirmen. Simulationen zeigen die Auflösung der Stratokumuluswolkendecke in einzelne verstreute Wolken, wenn der CO₂-Gehalt über 1.200 Parts per million steigt.⁴⁶ Dieser Kippunkt führt neben der Erwärmung durch den CO₂-Anstieg zu einer globalen Oberflächenerwärmung von etwa 8 °C in den niedrigen Breitengraden und 10 °C in den Tropen. Dieser Kippunkt könnte bereits bei früheren Klimawechseln – wie beim Übergang Eozän–Oligozän vor 34 Millionen Jahren – eine Rolle gespielt haben. Noch scheint ein derartiger hoher Anstieg des CO₂-Gehalts in der Atmosphäre weit entfernt, allerdings zeigt das Beispiel, wie vielfältig und unerwartet Kippeffekte auftreten können.

⁴⁵ Senf, C.; Seidl, R. (2020): Mapping the forest disturbance regimes of Europe; <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/2020.03.30.015875v2>, abgerufen am 17.9.2020.

⁴⁶ Schneider, T.; et al. (2019): Possible climate transitions from breakup of stratocumulus decks under greenhouse warming; Nature Geoscience Vol. 12; <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0310-1>, abgerufen am 18.1.2020.

9.2 Das Konzept der Strahlungsantriebe

ZUSATZINFORMATION

Ein einfaches Modell der Strahlungsflüsse

Der solare Energiefluss, der auf die Erde trifft, entspricht $S_0 = 341 \text{ W/m}^2$ (siehe Kapitel 7.5). Die von der Erde absorbierte Energie errechnet sich nach

$$S_{\text{absorb}} = S_0 - \alpha \cdot S_0 = (1 - \alpha) \cdot S_0$$

Für das Strahlungsbudget gilt (absorbierte solare Energie minus abgestrahlte Wärmeenergie der Erde)

$$\frac{dE}{dt} = (1 - \alpha) \cdot S_0 - k_B \cdot T_{\text{Emission}}^4$$

Die Erde speichert die Energie vor allem im Ozean und geringe Teile in der Atmosphäre. Für das Wärmespeichervermögen gilt

$$E = C \cdot T_{\text{Erde}}$$

E → Energie [Ws]

C → Effektive Wärmekapazität [$\text{J}/^\circ\text{K}/\text{m}^2$]

T_{Erde} → Globale mittlere Oberflächentemperatur [$^\circ\text{K}$]

S_0 → Solare eingestrahlte Energie [W/m^2]

α → Albedo der Erde

Nach Einsetzen in die Strahlungsbudgetformel ergibt sich

$$C \frac{dT_{\text{Erde}}}{dt} = (1 - \alpha) \cdot S_0 - k_B \cdot T_{\text{Emission}}^4$$

Befindet sich das klimatische System im Gleichgewicht, dann ist die zeitliche Änderung = 0, und es gilt

$$(1 - \alpha) \cdot S_0 = k_B \cdot T_{\text{Emission}}^4$$

Nach Auflösen der Formel nach T_{Emission} ergibt sich die T_{Emission} zu $254,7^\circ\text{K}$, das entspricht einer Temperatur von $-18,4^\circ\text{C}$. Diese Temperatur würde sich ohne Treibhauswirkung einstellen.

$$C \frac{dT_{\text{Erde}}}{dt} = (1 - \alpha) \cdot S_0 - k_B \cdot T_{\text{Emission}}^4 = F_{\text{Atm}}$$

F_{Atm} → Nach unten zur Erde gerichteter Energiefluss [W/m^2]

t → Zeit [s]

$\frac{d}{dt}$ → Differentialoperator (Ableitung der Funktion nach der Zeit)

k_B → Boltzmann Konstante [$\text{J}/^\circ\text{K}$]

Fortsetzung >

Wird das klimatische System aus dem Gleichgewicht gebracht – das heißt, es wird Energie zugeführt, die als Strahlungsantrieb R bezeichnet wird –, führt dies zu einer Änderung der globalen mittleren Erdoberflächentemperatur und des Energieflusses wie folgt

$$C \frac{d\Delta T_{\text{Erde}}}{dt} = R + \Delta F_{\text{Atm}}$$

Die vereinfachende Grundannahme des Konzepts der Strahlungsantriebe ist, dass diese proportional zur Erdoberflächentemperatur wirken:

$$\Delta F_{\text{Atm}} = \lambda \cdot \Delta T_{\text{Erde}}$$

Damit ergibt sich

$$C \frac{d\Delta T_{\text{Erde}}}{dt} = R + \lambda \cdot \Delta T_{\text{Erde}}$$

λ → Klima Rückkopplungsparameter [$\text{W}/\text{m}^2/^\circ\text{K}$]

Unter der Annahme, dass nach der Einwirkung des Strahlungsantriebes so lange gewartet wird, bis sich ein klimatischer Gleichgewichtszustand eingestellt hat, die zeitliche Änderung also null ist, gilt

$$C \frac{d\Delta T_{\text{Erde}}}{dt} = 0 = R + \lambda \cdot \Delta T_{\text{Erde}}$$

Mit der vereinfachten Annahme, dass die Emissionstemperatur der Erde mit der globalen Erdoberflächentemperatur wie folgt zusammenhängt (β aus Beobachtung = 0,885)

$$T_{\text{Emission}} = \beta \cdot T_{\text{Erde}}$$

ergibt sich T_{Erde} zu

$$T_{\text{Erde}} = \frac{T_{\text{Emission}}}{\beta} = \frac{254,7}{0,885} = 288 \text{ °K } (+14,9^\circ\text{C})$$

Aus diesen physikalischen Zusammenhängen gilt nun für das einfache Klimamodell

$$C \frac{dT_{\text{Erde}}}{dt} = (1 - \alpha) \cdot S_0 - k_B \cdot (\beta \cdot T_{\text{Erde}})^4$$

Nun wird ein Strahlungsantrieb hinzugefügt

$$C \frac{dT_{\text{Erde}}}{dt} = (1 - \alpha) \cdot S_0 - k_B \cdot (\beta \cdot T_{\text{Erde}})^4 + R$$

Unter der Annahme einer kleinen Störung kann λ als linearer Faktor (Entwicklung in eine Taylorreihe und Abbruch nach dem ersten Glied) wie folgt ermittelt werden

$$\lambda = \frac{d}{dT_{\text{Erde}}} [(1 - \alpha) \cdot S_0 - k_B \cdot (\beta \cdot T_{\text{Erde}})^4] = -4 \cdot k_B \cdot \beta^4 \cdot T_{\text{Erde}}^3 = -3,3 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{K}} = \lambda_{\text{Planck}}$$

Jedes Klimamodell hat diese grundsätzliche Rückkopplung, die als »Planck-Rückkopplung« bezeichnet wird. Diese beschreibt den Umstand, dass ein wärmerer Planet mehr Strahlung abgibt als ein kälterer.

Fortsetzung ▷

Die Wirkung eines Klimaantriebes R kann nun (nach dem Einstellen eines Gleichgewichtszustandes) wie folgt errechnet werden:

$$C \frac{d\Delta T_{\text{Erde}}}{dt} = 0 = R + \lambda \cdot \Delta T_{\text{Erde}}$$

Daraus folgt

$$\Delta T_{\text{Erde}} = -\frac{R}{\lambda}$$

Da die Planck-Rückkopplung in allen Klimamodellen auftritt und nur den Einfluss der Schwarzkörperstrahlung wiedergibt, wird der Einfluss der anderen wirkenden Rückkopplungen der Strahlungsantriebe λ_i (Treibhausgase, Landnutzungsänderungen, Aerosole, Albedoänderung etc.) wie folgt berücksichtigt

$$\lambda = \lambda_{\text{Planck}} + \lambda_1 + \lambda_2 + \dots = \lambda_{\text{Planck}} + \sum_{i=1}^n \lambda_i$$

Eine Vielzahl von Faktoren beeinflussen das Klima. Es stellt sich die Frage, wie stark die verschiedenen Einflüsse auf das Klima wirken. Will man selbst seine Lebensgewohnheiten hin zu klima- und umweltschonenden ändern, ist es notwendig, die Parameter mit der größten Wirkung zu kennen – Müll trennen oder statt Auto fahren öffentliche Verkehrsmittel nutzen, auf Langstreckenflüge verzichten oder auf vegetarische Kost umsteigen.

Wie wird der Einfluss verschiedener Parameter auf das Klima objektiv bewertet und verglichen? Zur Beantwortung dieser Frage entwickelten Wissenschaftler ein Konzept zur Vergleichbarkeit der Einflussfaktoren über ihren Strahlungsantrieb (siehe Zusatzinformationskasten für mathematisch/physikalisch Interessierte).

Die Erde ist einer hochenergetischen kurzwelligen Strahlung durch die Sonne ausgesetzt. Die Strahlungsleistung der Sonne beträgt heute 1.362 Watt pro Quadratmeter. Sie steigerte langsam im Laufe von Millionen Jahren ihre Kernfusion und erhöhte sukzessive die abgegebene Strahlungsleistung. Die Erde ohne Atmosphäre erwärmt sich durch die Sonnenenergie auf 254,8 °K oder -18,4 °C. Mit der Atmosphäre werden heute im Mittel 287,1 °K oder 14 °C auf der Erdoberfläche gemessen. Dies entspricht einem Temperaturunterschied von 32,3 °C. Diese Temperaturdifferenz verursacht der Rückstrahlungseffekt der angeregten Treibhausgasatome. Wasserdampf und alle anderen Treibhausgase (engl. Green House Gases, GHG) nehmen Energie von der Sonne und von der im langwelligen elektromagnetischen Bereich strahlenden Erde auf, werden angeregt und senden ihre Anregungsenergie teilweise zur Erde zurück. Treibhausgase und alle anderen das Erdklima beeinflussenden Faktoren wirken physikalisch gesehen energiespendend. Diese Interpretation führt zum Konzept der Strahlungsantriebe in Watt pro Quadratmeter (engl. Radiative Forcing, RF), mit denen der Einfluss klimabeeinflussender Akteure beschrieben wird. Die Auswirkung der Strahlungsantriebe

(Triebkräfte des Klimas) auf eine Erhöhung oder Erniedrigung der Erdtemperatur wird als Klimasensitivität in °C pro Watt und Quadratmeter bezeichnet.

Richtungsweisend war die berühmte sogenannte Charney-Studie.⁴⁷ Diese errechnete für eine Verdopplung des CO₂-Anteils in der Atmosphäre einen Strahlungsantrieb von 4 Watt pro Quadratmeter und schätzte die daraus folgende globale Erwärmung auf etwa 3 °C. Für 3 °C bei 4 Watt pro Quadratmeter liegt die Klimasensitivität für CO₂ entsprechend bei 0,75 °C pro Watt und Quadratmeter. Die Ergebnisse dieses Berichts sind bis heute wegweisend.

Die Gleichgewichtsklimaempfindlichkeit (ECS, engl. Equilibrium climate sensitivity) ist die global gemittelte Oberflächentemperaturänderung im Gleichgewicht mit einer Verdoppelung der atmosphärischen CO₂-Konzentration. Dieser Ansatz nimmt in der Klimawissenschaft einen mythischen Status ein. Seit seiner Einführung und ersten Bewertung durch Charney et al. (1979)⁴⁸ bis zum letzten Bericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), dem Fünften Sachstandsbericht (AR5), bewegte sich diese Spanne um 1,5 bis 4,5 °C per Verdopplung der CO₂-Konzentration. Im Unterschied dazu gibt es die Übergangsklimaantwort (TCR, engl. Transient climate response). Diese gibt jene globale Erdtemperatur an, die bei der doppelten CO₂-Konzentration gemessen wird, die nachwirkenden ausgelösten Klimarückkopplungen werden nicht berücksichtigt. Es gilt:

- ▷ Gleichgewichtsklimaempfindlichkeit ECS 2,6 – 3,9 °C (nach einer neueren Arbeit im Jahr 2020 veröffentlicht)⁴⁹
- ▷ Übergangsklimaantwort TCR 1 – 2,5 °C, bester Wert 1,5 °C

Neben den Einflüssen, die verschiedene Treibhausgase auf das Klima haben, zählen Aerosole (kleine Teilchen, Verschmutzungen in der Atmosphäre im kurzwelligen Spektrum) zu wichtigen beeinflussenden Faktoren. Aerosole können sowohl wärmende als auch kühlende Wirkung haben. Es gibt verschiedene Arten von kohlenstoffhaltigen Aerosolen, die eine große Vielfalt an Mischzuständen aufweisen. Jede Art beeinflusst die Bildung von Wassertropfen und Eiskristallen auf ihre Weise. Starke kühlenden Einfluss bewirken emittierte Staubwolken bei Vulkanausbrüchen. Im Gegensatz zu den sich gleichmäßig über die Erde verteilenden und vermischenden Treibhausgasen weisen Aerosole eine inhomogene zeitliche und räumliche Verteilung auf. Die Abschätzung dieser Einflüsse ist schwierig und bildet einen wesentlichen Unsicherheitsfaktor für die Angabe der Strahlungsantriebe. Veränderungen der

⁴⁷ National Academy of Sciences (1979): Carbon Dioxide and Climate: A Scientific Assessment.

⁴⁸ National Research Council (1979): Carbon Dioxide and Climate: A Scientific Assessment. Washington, DC: The National Academies Press; <https://doi.org/10.17226/12181>, abgerufen am 24.4.2021.

⁴⁹ Sherwood, S. et al. (2020): An assessment of Earth's climate sensitivity using multiple lines of evidence; American Geophysical Union, Rev. Geophysics and WCRP; <https://doi.org/10.1029/2019RG000678>, abgerufen am 6.9.2020.

Landnutzung (Änderung der Albedo) werden ebenfalls als Strahlungsantrieb angegeben. Auch die Art der Wolken und deren Höhe beeinflussen die Klimarückwirkung. Die Einführung des Begriffs des Strahlungsantriebes liefert eine Maßzahl, wie die menschlichen Aktivitäten sowie natürliche Faktoren den Energiefluss des Klimasystems beeinflussen.

Das Klimasystem stellt physikalisch ein Strahlungsgleichgewicht zwischen zugeführter und abgegebener Energie her. Die durch Menschen zusätzlich verursachte Energiezufuhr gleicht das Erdklima durch eine Temperaturerhöhung, verbunden mit erhöhter Energieabstrahlung, aus. Dieses komplexe System kann nur sehr schwer in Modellen dargestellt und berechnet werden, da Temperaturänderungen zu verschiedenen Rückkopplungseffekten führen können. Die Zeitkonstanten der das Klima beeinflussenden Größen sind stark unterschiedlich. Das Meer ist ein riesiges Wärmereservoir. Die Zeitkonstante, mit der es auf Temperaturveränderungen reagiert, ist sehr lang. Das Eisschild der Antarktis benötigt zum Schmelzen sehr viel Energie über lange Zeiträume hinweg. Anders reagiert die Atmosphäre wegen ihrer geringeren Wärmespeicherkapazität. Sie antwortet wesentlich schneller auf Störungen des Energiegleichgewichts, hinzu gesellen sich natürliche Strahlungsantriebe – Strahlungsschwankungen der Sonne, die Einflüsse der komplizierten Erdbewegungen oder Vulkanausbrüche, die bis in die Troposphäre feine Teilchen emporwirbeln.

Das Meer, welches die Wärme an der Oberfläche aufnimmt, braucht Jahrhunderte, bis sich Oberflächenwasser (100 bis 700 Meter) mit kalten tieferen Schichten (>2 Kilometer) vermischt. Im Meerwasser sind Spuren der vergangenen großen Vulkanausbrüche und Störungen des früheren Klimas gespeichert und wirken träge immer noch nach. Ebenso erzeugen die von der Menschheit eingebrachten Störungen ein langanhaltendes Wärmegedächtnis des Meeres. Selbst bei einem sofortigen Stopp des CO₂-Eintrags wird die globale Erdtemperatur noch Jahrhunderte weiter ansteigen, bis wieder ein Gleichgewichtszustand erreicht ist.

Die Beziehung zwischen Strahlungsantrieb und globaler Temperatur kann wie folgt angegeben werden:

$$dT_{\text{Erde}} \sim S \cdot dF = -\frac{dF}{\lambda}$$

dT_{Erde} entspricht dabei einer kleinen Veränderung der globalen mittleren Erdtemperatur, dF dem betrachteten Strahlungsantrieb, S der Klimasensitivität und λ der Klimarückkopplung in Watt pro Quadratmeter und Grad. Eine Verdopplung des CO₂-Gehalts entspricht einem Strahlungsantrieb von 3,7 Watt pro Quadratmeter. Es ist üblich, die verschiedenen Klimaertriebe auf die Wirkung des doppelten CO₂-Gehalts zu beziehen, weil dies der Wert ist, bei dem sich die CO₂-Konzentration (bezogen auf das vorindustrielle Zeitalter) nach Erwartungen der Wissenschaftler einpendeln muss, wenn die Auswirkungen des Klimawandels halbwegs ertragbar bleiben sollen.

In der statischen Beschreibung des Strahlungsantriebs ist es schwierig, zeitlich schnelle troposphärische Anpassungen (Wolkenbildung, Wirkung von Aerosolen) zu

Lachgas

wird in Kombination mit Sauerstoff als Anästhetikum bei klinischen Operationen eingesetzt. Der Name rührt entweder vom Auftreten euphorischer Zustände beim Patienten oder vom Auftreten von Zwerchfellkrämpfen her, die als Lachen interpretiert werden.

beschreiben. Diese Einflüsse werden durch eine Erweiterung der oben angegebenen Beziehung auf die sogenannten Effektiven Strahlungsantriebe miterfasst:

$$dT_{\text{Erde}} \sim E_i \cdot S_{\text{CO}_2} \cdot dF$$

E_i steht für die Wirksamkeit eines bestimmten Klimaänderungsmechanismus, die durch das Verhältnis der Klimasensitivität für diesen Mechanismus zu jener für das CO_2 gegeben ist. So ergibt sich die Effektivität verschiedener Treibhausgase, bezogen auf CO_2 , wie folgt:

Table 14: Effektivität verschiedener Treibhausgase gegenüber CO_2 .

Gas	Effektivität E_i gegenüber CO_2
CO_2	1
Methan CH_4	28-fach
Lachgas N_2O	265-fach
Fluorierte/halogenierte Verbindungen	100 – 24.000-fach

9.2.1 Strahlungsantrieb durch Treibhausgase

9.2.1.1 Strahlungsantrieb CO_2

Eine genaue Berechnung des Strahlungsantriebs durch CO_2 und andere gasförmige Bestandteile der Erdatmosphäre wurde erst durch genauere spektroskopische Messgeräte möglich. CO_2 wirkt vor allem im langwelligen elektromagnetischen Emissionsband. Mittlerweile sind die physikalischen Schwingungsmoden und Eigenschaften der einzelnen Absorptionsbänder der wesentlichen Treibhausgase bestens bekannt. In Fraunhofer-Liniendatenbanken⁵⁰ sind über 50 strahlungsaktive gasförmige Substanzen detailliert gespeichert und dienen als Grundlage der Berechnung der Strahlungsantriebe. Der aktuelle Strahlungsantrieb von CO_2 in Bezug auf den vorindustriellen Wert im Jahr (1759) beträgt (2019) 2,05 Watt pro Quadratmeter. Der Strahlungsantrieb der Treibhausgase nimmt mit ihrer Konzentration zu und wirkt verstärkend.

⁵⁰ HITRAN Datenbank; die Datenbanken HITRAN und HITEMP werden in der Abteilung für Atom- und Molekularphysik, Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, entwickelt und gepflegt; <https://hitran.org/>, abgerufen am 27.12.2019.

Tabelle 15 zeigt die steigende Zunahme der CO₂-Konzentration pro Jahr.

Tabelle 15: Zunahme der CO₂-Konzentration im Laufe der Zeit.

Treibhausgas	Vergangene Zunahme während eines Zeitraumes von ...		
	... 40 Jahren	... 10 Jahren	... 1 Jahr
Kohlendioxid CO ₂	1,83 ppm	2,3 ppm	2,05 ppm

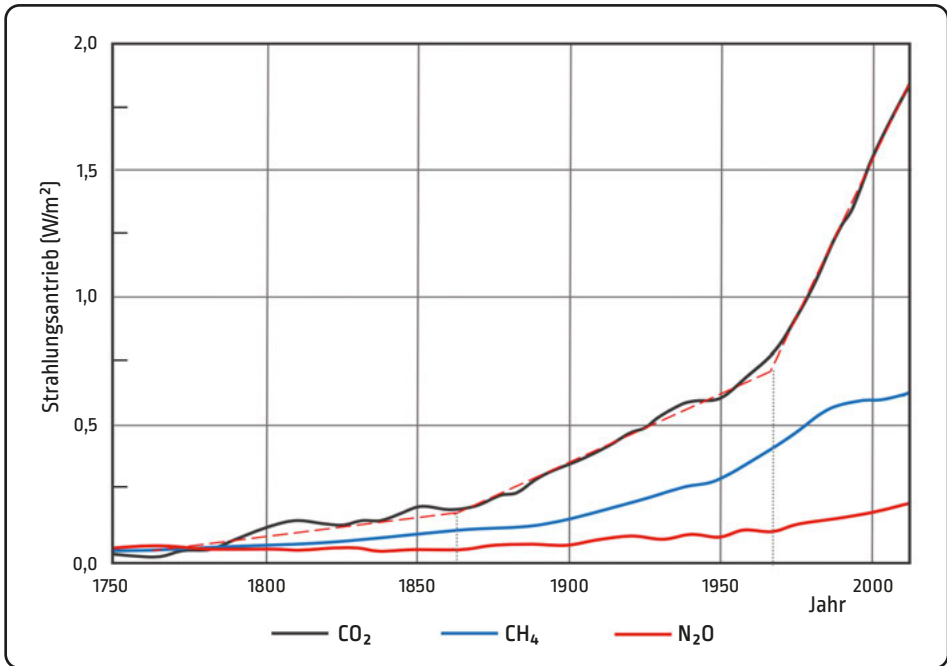


Abbildung 108: Strahlungsantrieb von CO₂, Distickoxid (N₂O) und Methan (CH₄). Strahlungsantriebe von 1750 bis 2011.

Dem Diagramm (Abbildung 108) deutlich zu entnehmen sind ein erster schneller Anstieg des CO₂-Strahlungsantriebes ab 1855 (Beginn der industriellen Revolution) und eine weitere deutliche Beschleunigung ab 1965 (Wirtschaftswunder – rasant zunehmender Individualverkehr).

Zur Zeit der Industrialisierung entdeckte der Mensch die Möglichkeit, thermische Energie in mechanische oder elektrische Energie umzuformen. Dies begann mit der Erfindung von dampfgetriebenen Maschinen, setzte sich in brennstoffgetriebenen Motoren und in mit aus Wasserkraftwerken oder thermischen Kraftwerken gewonnener elektrischer Energie fort. Die elektrische Energie ist verlustarm über elektrische Hochspannungsleitungen über weite Strecken übertragbar und kann problemlos

mit hohem Wirkungsgrad in thermische oder mechanische Energie rückverwandelt werden.

Die industriellen Revolutionen, die durch die Erkenntnisse der Wissenschaftler ausgelöst wurden, erlaubten den Ersatz schwerer körperlicher Arbeit durch mechanische Hilfen bzw. gingen weit über menschliche Kräfte hinaus. Die thermische Energie wird vorrangig aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe – Erdöl, raffinierte Stoffe, Erdgas und Kohle – bezogen. Da sich CO_2 , im Gegensatz zu anderen Treibhausgasen, nicht selbstständig zersetzt, muss es durch andere Mechanismen abgebaut werden. Dies geschieht durch Pflanzen, die Kohlenstoffdioxid durch Photosynthese in Glucose umwandeln, durch die Aufnahme von CO_2 in den Ozeanen oder durch die Verwitterung von Gestein oder die Einlagerung in marine Lebewesen.

Der atmosphärische CO_2 -Anstieg gegenüber dem vorindustriellen Niveau wurde zunächst durch Entwaldung und Landnutzungsänderungen verursacht. Die Emissionen aus fossilen Brennstoffen begannen bereits vor der industriellen Ära, wurden aber erst ab 1950 zur dominierenden Quelle. Die menschlich eingebrachten Emissionen überlagern einen aktiven natürlichen Kreislauf, der den Kohlenstoff zwischen der Atmosphäre, dem Ozean und der Biosphäre zirkulieren lässt.

9.2.1.2 *Strahlungsantriebe Methan, Lachgas, FCKW und halogenisierte Verbindungen*

Die atmosphärischen Konzentrationen von Methan in der Atmosphäre sind um einen Faktor 200 kleiner als die von CO_2 . Eine genaue Messung des Methananteils ist daher schwierig. Erst Instrumente mit höherem Auflösungsvermögen ermöglichten eine exakte Messung. Der Anteil von Lachgas ist noch viel geringer als jener von Methan und ist um den Faktor 1.200 kleiner als jener von CO_2 .

Ähnlich wie CO_2 nimmt Methan in seiner Konzentration immer mehr zu. In überfluteten Regionen gedeihen Methanogene, die aus organischem Material im Boden Methan produzieren. Zusätzlich zu den Veränderungen in den natürlichen Feuchtgebieten erhöhten die Ausdehnung des Reisanbaus, die Erdöl- und Erdgasförderung und die industrialisierte Viehzucht die Methanproduktion.

9.2.1.3 Berechnung der Strahlungsantriebe der wichtigsten Treibhausgase

Die Strahlungsantriebe der wichtigsten Treibhausgase, ausgehend von der vorindustriellen Zeit (mit 1750 angenommen) errechnen sich wie folgt:

Tabelle 16: Berechnungsformel für den Strahlungsantrieb der wichtigsten Treibhausgase.

Treibhausgas	Berechnungsformel	Konstante
Kohlendioxid CO ₂	$F_{CO_2} = \alpha \cdot \ln \left(\frac{C}{C_0} \right)$	$\alpha = 5,35$
Methan CH ₄	$F_{CH_4} = \beta \cdot (\sqrt{M} - \sqrt{N_0}) - [f(M, N_0) - f(M_0, N_0)]$	$\beta = 0,036$
Distickoxid N ₂ O	$F_{N_2O} = \varepsilon \cdot (\sqrt{M_0} - \sqrt{N}) - [f(M_0, N) - f(M_0, N_0)]$	$\varepsilon = 0,12$
Halogenierte Verbindung CFC11	$F_{CFC11} = \lambda \cdot (X - X_0)$	$\lambda = 0,25$
Halogenierte Verbindung CFC12	$F_{CFC12} = \omega \cdot (X - X_0)$	$\omega = 0,32$

C steht für CO₂, M für CH₄, N für N₂O und X für die CFCs. Der Index 0 steht für die vorindustriellen Werte. Für die Funktion f(M,N) gilt:

$$f(M, N) = 0,47 \cdot \ln(1 + 2,01 \cdot 10^{-5} \cdot (M \cdot N)^{0,75} + 5,31 \cdot 10^{-15} \cdot M \cdot (M \cdot N)^{1,52})$$

Mit den aktuell gemessenen Treibhausgaskonzentrationen ergibt sich:

Tabelle 17: Berechnete Strahlungsantriebe für die wichtigsten Treibhausgase in Bezug auf die vorindustrielle Konzentration im Jahr 1750.

Treibhausgas	1750 Konzentration	2019 Konzentration	Antrieb F (W/m ²)
Kohlendioxid CO ₂ (ppm) [C]	278	407,8	2,05
Methan CH ₄ (ppb) [M]	722	1.869	0,52
Lachgas N ₂ O (ppb) [N]	270	331	0,20
Halogenierte Verbindung CFC11 (ppb) [X]	0	0,228	0,06
Halogenierte Verbindung CFC12 (ppb) [X]	0	0,506	0,16

9.2.2 Strahlungsantrieb: Aerosole

Aerosole bilden Gemische aus festen und flüssigen Schwebeteilchen in der Atmosphäre. Die kleinsten Partikel sind wenige Nanometer groß. Aerosole verändern sich durch Kondensation von Dämpfen an Partikeln oder durch Verdampfen flüssiger Anteile. Dies erschwert die eindeutige Zuordnung als Strahlungsantrieb und die Art der Wirkung – kühlend oder temperaturerhöhend. Durch Waldbrände, Industrieabgase, Flugzeuge, Wüstenstaub, Verbrennung fossiler Brennstoffe sowie durch Vulkanausbrüche stoßen Aerosole bis weit in die Troposphäre vor. Generell werden künftig die Einflüsse der Aerosole auf den Strahlungsantrieb immer unbedeutender, weil die Zunahme der Treibhausgase derart rapide erfolgt, dass die Aerosolwirkung zu vernachlässigen sein wird. Die weltweiten Schwefeldioxidemissionen (saurer Regen) haben sich seit 1990 stabilisiert und sinken seither. Das ist das Ergebnis einer wirksamen Luftreinhaltepolitik. Paradox ist, dass dieser Umwelterfolg gleichzeitig den Strahlungsantrieb weiter erhöht, da die kühlend wirkenden SO_2 -Aerosole abnehmen. In der EU und in den USA sind die Schwefeldioxidemissionen seit ihrem Höchststand um den Faktor 5 zurückgegangen.

Trockenes, unbewachsenes Land, das starken Winden ausgesetzt ist, ermöglicht das Mitreißen von Staub in die Atmosphäre. Das ist die massenmäßig größte Quelle von Aerosolen. Untersuchungen weisen auf eine Staubzunahme innerhalb des 20. Jahrhunderts um fast den Faktor 2 hin. Der Beitrag von Staub zu den Strahlungsantrieben ist allerdings gering.

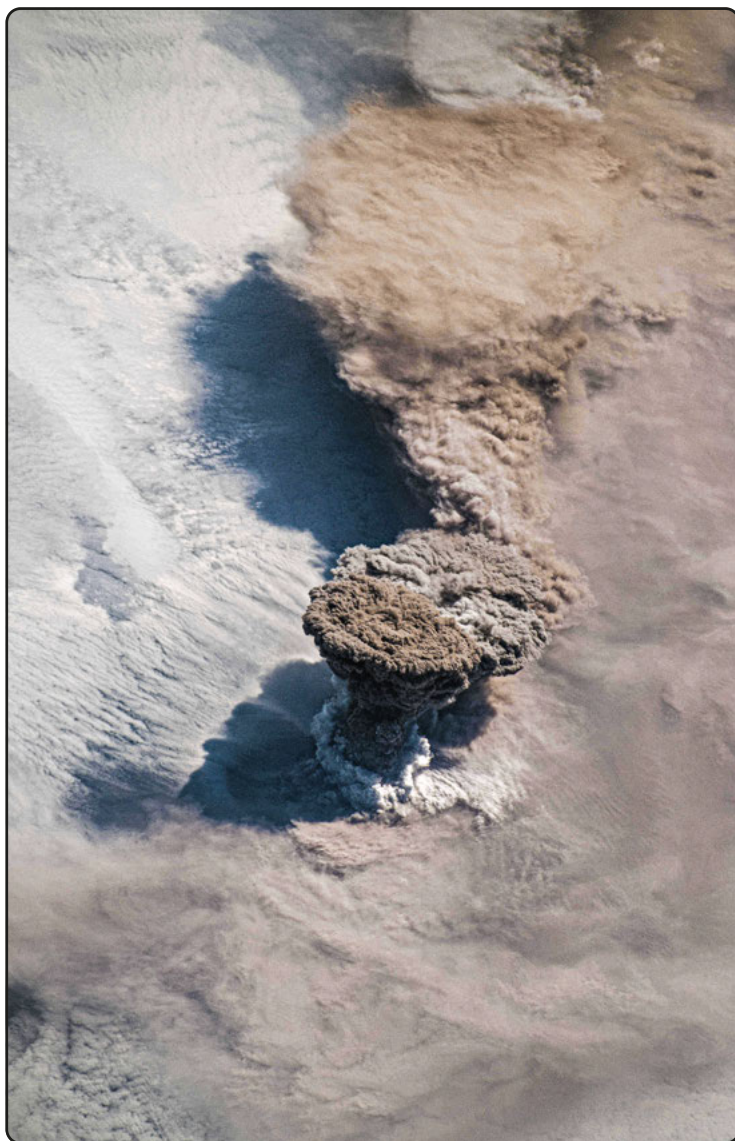
9.2.2.1 Strahlungsantrieb: Kondensstreifen und kondensstreifeninduzierte Trübung

Eine wichtige Komponente aus dem Flugzeugbetrieb entsteht durch den Ausstoß heißer feuchter Luft und Aerosolen aus den Triebwerken in die obere Troposphäre und die untere Stratosphäre. Die linearen Kondensstreifen können sich zu Zirkuswolken entwickeln, die überwiegend aus Eiskristallen bestehen. Der entsprechende Klimaantrieb wird als relativ gering (0,05 Watt pro Quadratmeter) angenommen. Nicht eingeschlossen in diesen Wert sind die entstehenden Verbrennungsgase des Flugverkehrs.

9.2.2.2 Strahlungsantrieb stratosphärische Aerosole

Eine gewisse Menge an sehr kleinen Sulfatpartikeln (10 bis 100 Nanometer) ist permanent in der Stratosphäre vorhanden und stört dadurch den Strahlungshaushalt. Diese stratosphärischen Aerosole nehmen nach Vulkanausbrüchen, die Material direkt in die Stratosphäre einbringen, stark zu. Vulkanische Einflüsse sind seit der Antike dokumentiert. Pompeji wurde durch den Ausbruch des Vesuvus 79 n. Chr. zerstört und verschüttet. Plutarch erwähnte, dass die Eruption des Ätna im Jahr 44 v. Chr. die Sonne verdunkelte und die Ernten vernichtete. Die Folge waren Hungersnöte in Rom und

Abbildung 109:
Ausbruch des Raikoke auf den Kurilen im Juni 2019, aufgenommen von der ISS-Raumstation.



Ägypten. Heute existiert eine umfassende Datenbank aktiver Vulkane und Vulkanausbrüche.⁵¹ Die Wirkung der durch Vulkane eingebrachten Aerosole hält 7 bis 8 Jahre an. Der tiefe Ozean reagiert träge auf die thermische Störung (100 Jahre), als könnte er sich besonders lange an vergangene Einflüsse erinnern – das Gedächtnis des Meeres. Stratosphärische Aerosole streuen die einfallende kurzwellige Strahlung der Sonne und vermindern die zur Erde gerichtete Sonnenstrahlung. Die Strahlungswirkung der

⁵¹ http://volcano.si.edu/reports_weekly.cfm, abgerufen am 29.12.2019.

stratosphärischen Aerosole ist gering, sie wirken kühlend. Der Strahlungsantrieb liegt zwischen $-0,01$ bis $-0,05$ Watt pro Quadratmeter.

Nach einem Vulkanausbruch wie dem des Raikoke 2019 ist die stärkste Wirkung nach einem halben Jahr zu beobachten. Sie sinkt danach innerhalb von 1 bis 2 Jahren auf 40 % ab.

9.2.3 Strahlungsantrieb Albedo-Veränderungen durch Landnutzung und Landbedeckungswechsel

Die Oberflächenalbedo variiert zwischen dunklen Wäldern, hellen Grasflächen oder Nutzpflanzen, kargen Wüsten oder schneebedeckten Flächen. Folglich führt paradoxerweise die Abholzung von Wäldern zur Erhöhung der Albedo, mehr Licht wird reflektiert, was die Erde abkühlt. Die größten Auswirkungen von Landnutzung und Entwaldung treten in höheren nördlicheren Breiten auf, da schneebedeckte Wälder eine niedrige Albedo haben, während schneebedeckte Ackerflächen eine hohe Albedo aufweisen. Gegenteilig wirkt bei der Entwaldung und Umwandlung natürlicher Flächen für die Bewirtschaftung die tendenziell größere direkte Freisetzung von Kohlendioxid. Aufforstung erhöht das natürliche Aufnahmevermögen von CO_2 . Waldbrände setzen erhebliche Mengen an Kohlendioxid, Schwefeldioxid, Methan und anderen organischen Gasen sowie kohlenstoffhaltige Aerosole frei. Wahrscheinlich überwiegen die kühlenden Effekte auf das Klima der in die Atmosphäre abgegebenen Aerosole. Böden setzen auf natürliche Weise Stickoxide und Ammoniak frei. Die Landwirtschaft

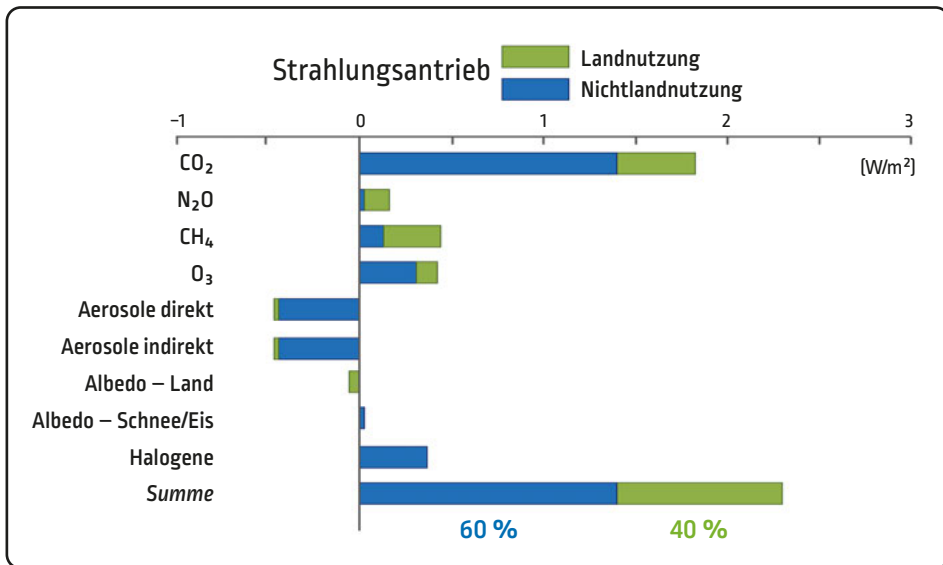


Abbildung 110: Strahlungsantrieb aus Landnutzung und aus anderen Strahlungsantrieben.

erhöhte die Stickstoffeinträge durch Düngereinsätze erheblich. Stickstoffbasierte Gase wie N_2O sind langlebige Treibhausgase mit einer Lebensdauer in der Größenordnung von 100 Jahren. Ammoniakemissionen stammen überwiegend aus Stickstoffdüngung im Rahmen der Acker- und Weidenutzung und verändern die Ammoniakerosole. Insgesamt wird der Strahlungsantrieb aus Landnutzung und Landbedeckungswechsel auf etwa 40 % des derzeitigen durch menschliche Eingriffe verursachten gesamten Strahlungsantriebes geschätzt (siehe Abbildung 110).

Ablagerung von Ruß auf Schnee verändert die Albedo des Schnees und verursacht einen geringen Strahlungsantrieb (+0,04 Watt pro Quadratmeter).

9.2.4 Solarer Strahlungsantrieb

Die aktuelle Sonnenstrahlungsforschung fußt auf drei Säulen:

- ▷ weltraumgestützten Messungen,
- ▷ Modellierung der beobachteten Sonnenintensitätsschwankungen und
- ▷ Erfassung und Verständnis der Reaktionen der Erde.

Die Anzahl der Sonnenflecken geht mit der Strahlungsstärke der Sonne einher (siehe Abbildung 111). Alle 27 Tage dreht sich die Sonne um ihre Achse. Die Strahlungsintensität verändert sich periodisch alle 11 Jahre. Die Erderwärmung infolge der Intensitätsschwankungen der Sonne ist bezogen auf den menschlichen Einfluss auf die Erderwärmung klein ($0,08\text{ }^\circ\text{C}$).

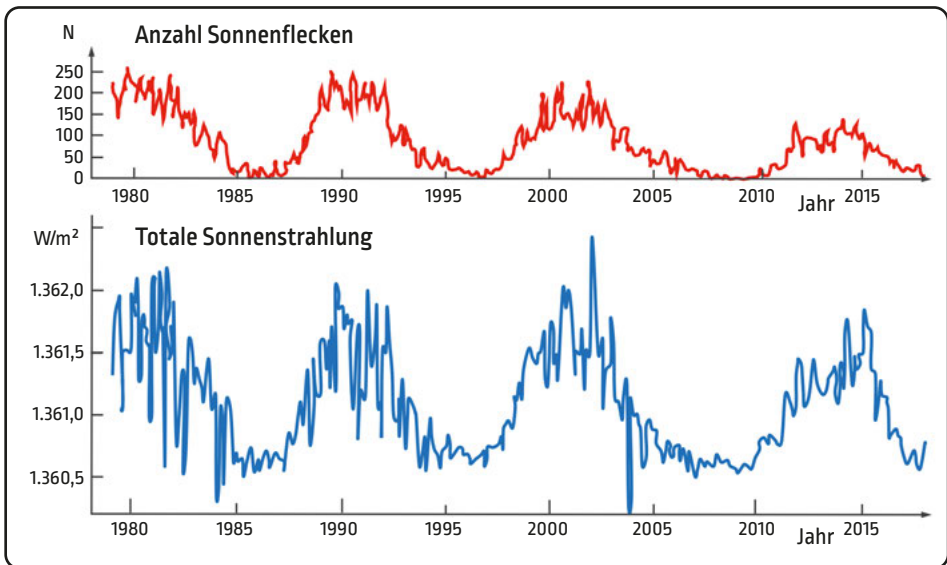


Abbildung 111: Anzahl der Sonnenflecken und die Strahlungsstärke der Sonne.

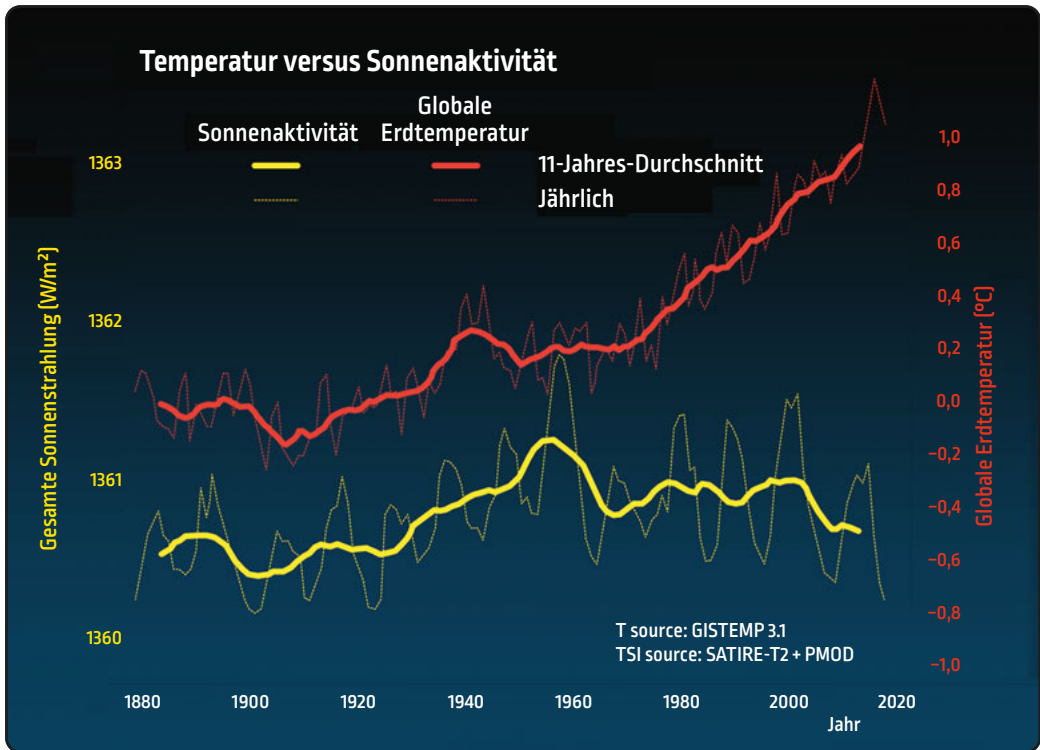


Abbildung 112: Globale Erdtemperatur und Solare Aktivität versus Zeit.

Abbildung 112 stellt klar, dass die globale Erderwärmung nicht auf die solare Aktivität zurückzuführen ist. Obwohl die Sonnenaktivität seit etwa den 1960ern im Mittel abnahm, steigt die Temperatur steil nach oben. Er ist mittlerweile von der Sonnenaktivität weitgehend abgekoppelt, da die anderen Strahlungsantriebe dominieren.

9.2.5 Gesamter natürlicher und anthropogener Strahlungsantrieb

Die Art der verschiedenen Antriebe ist hinsichtlich ihrer Größe, ihrer Genauigkeit in der Bestimmung, ihrer räumlichen Verteilung auf der Erde und ihrer zeitlichen Entwicklung stark unterschiedlich. Die zeitliche Entwicklung der natürlichen Klimaantriebe und der durch den Menschen verursachten führt zu einem besseren Verständnis der Abhängigkeiten zwischen beiden.

Ab 1850 sind die menschlichen (anthropogenen) Einflüsse deutlich zu erkennen. Ab 1959 wird die Kurve steiler, der durch den Menschen verursachte Eintrag der Treibhausgase nimmt zu. Die braunen Dreiecke in der Abbildung 113 markieren große Vulkanausbrüche, die einen kühlenden Einfluss auf die Atmosphäre hatten (steile hellgrüne Spitzen nach unten). Die rote Linie stellt den menschlichen Antrieb und die schwarze Linie den Gesamtantrieb dar. Werden von den (oberhalb der Nulllinie ein-

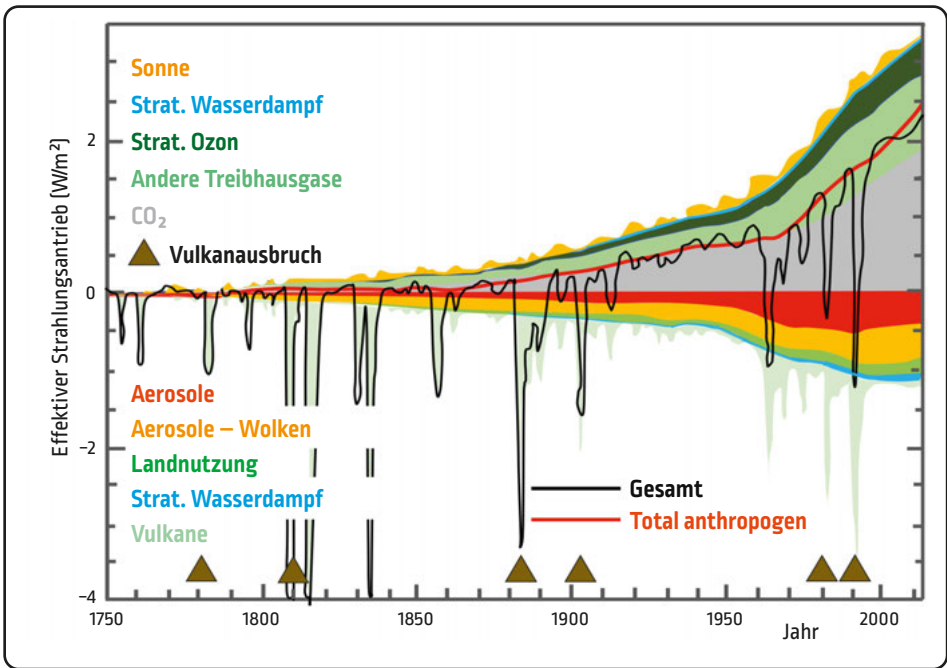
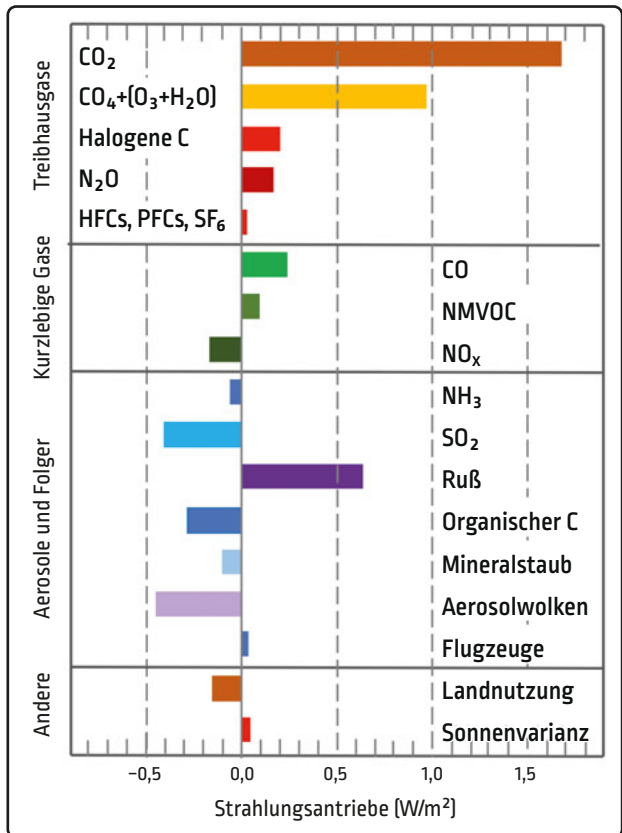


Abbildung 113:
Zeitliche Entwicklung
der effektiven
Strahlungsantriebe.

Abbildung 114:
Übersicht über die positiv
und negativ wirkenden
Strahlungsantriebe
(gemittelt über den Zeitraum
von 1750 bis 2011).



gezeichneten) positiv wirkenden Antrieben (erwärmenden) die natürlichen absorbierenden (kühlenden) abgezogen, ergibt sich der Gesamtantrieb.

Positive Strahlungsantriebe wirken erwärmend, negative abkühlend (siehe Abbildung 114). HFCs sind Fluorkohlenwasserstoffe, PFCs stehen für Polyfluorierte Chemikalien, NO_x bezeichnen Stickoxide, NMVOC steht für flüchtige organische Verbindungen (wie Lösungsmittel etc.), und SF₆ ist Schwefelhexafluorid. Die Gesamtsumme aller Strahlungsantriebe ergibt +2,3 Watt pro Quadratmeter (2011) und wirkt erd-erwärmend.

9.2.6 Die Auswirkung der Strahlungsantriebe auf das Erdklima

Können diese Strahlungsantriebe direkt auf die zu erwartete Steigerung der globalen Erdtemperatur umgerechnet werden? Nein, eine direkte Umrechnung der Strahlungsantriebe mit der Planck'schen Formel würde falsche Ergebnisse zeigen, da die Rückstrahlereffekte der Erdatmosphäre nicht berücksichtigt wären.

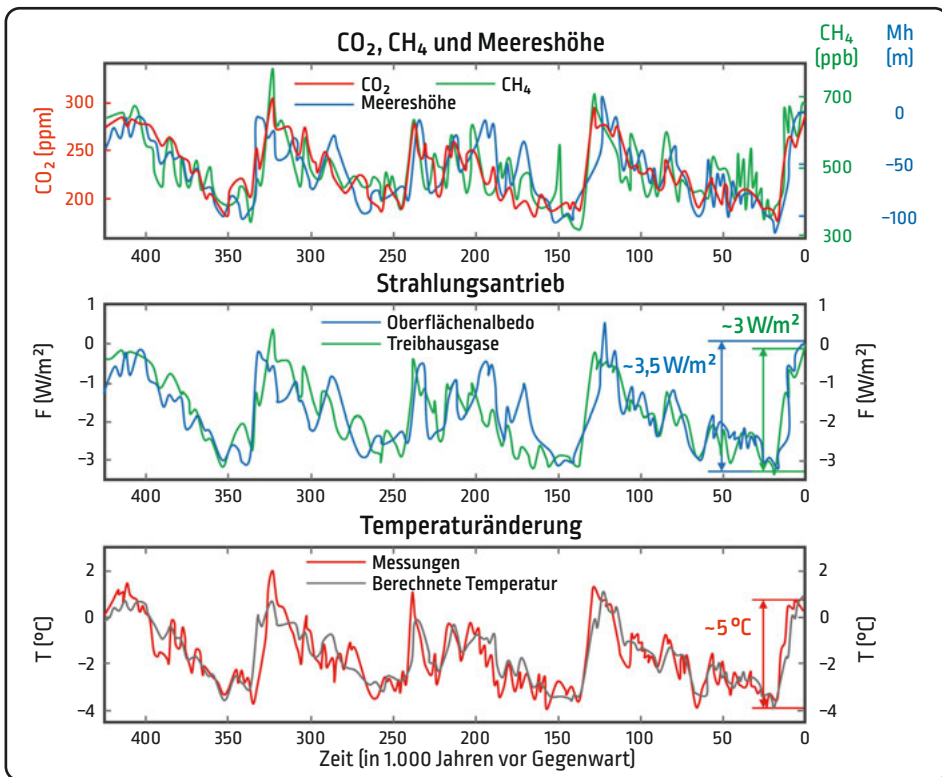


Abbildung 115: Verlauf der Treibhausgaskonzentrationen, der Meereshöhe, der Strahlungsantriebe und der Erdtemperatur in den letzten 425.000 Jahren.

9.2.6.1 Schnell wirkende Klimareaktion

Das Klimasystem ist ein komplexes System mit nicht linearen Rückkopplungen zahlreicher Komponenten. Selbst aktuelle aufwendige Klimamodelle und Klimasimulationen bilden nicht alle Effekte genau genug ab.

Mittlerweile sind die Verläufe von Temperatur, Sauerstoff, Treibhausgasen und Meeresspiegel prähistorischer Zeit sehr gut gemessen und bekannt. Der paläontologische Blick zurück ist wichtig, denn er erlaubt Rückschlüsse von vergangenen Klimareaktionen auf die gegenwärtige Klimasituation.

Abbildung 115 gibt den Verlauf von CO_2 und CH_4 auf Meereshöhe für die vergangenen 425.000 Jahre an. Die letzte Eiszeit liegt 20.000 Jahre zurück, erkennbar am steilen Anstieg von 180 auf 300 Parts per Million CO_2 . Die Seehöhe stieg im Wechsel von der letzten Eiszeit auf die Zwischeneiszeit um mehr als 100 Meter. Im mittleren Diagramm sind die Strahlungsantriebe für die Treibhausgase und die Oberflächenalbedo eingetragen. Die Strahlungsantriebe nehmen nach einer Zwischeneiszeit (mit erhöhten Temperaturen z. B. vor 125.000 Jahren) langsam ab. Diese Abnahme verläuft analog zur Konzentration der Treibhausgase und der Oberflächenalbedo.

9.2.6.2 Berechnung der Effektivität der Klimastörung durch eine Veränderung der Konzentration der Treibhausgase

Der gesamte Strahlungsantrieb, der während des schnellen Anstiegs von der letzten Eiszeit zur heutigen Zwischeneiszeit führte, betrug 6,5 Watt pro Quadratmeter. 3 Watt pro Quadratmeter stammten dabei von der Veränderung der Treibhausgase (vorrangig CO_2) und 3,5 Watt pro Quadratmeter von der Veränderung der Oberflächenalbedo. Die globale Erdtemperatur stieg im selben Zeitraum um 5°C an. Dies ergibt eine Klimaempfindlichkeit von:

$$S = \frac{\Delta T}{\Delta F} = \frac{5^\circ\text{C}}{6,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}} \approx 0,75 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}/\text{m}^2}$$

Eine Verdopplung der CO_2 -Konzentration entspricht

$$2 \cdot \text{CO}_2 (1750) = 2 \cdot 278 \text{ ppm} = 556 \text{ ppm}$$

Für eine Verdopplung der CO_2 -Konzentrationen wird mit einem äquivalenten Strahlungsantrieb von 3,7 Watt pro Quadratmeter gerechnet. Das ergibt bei einer Klimasensitivität von $0,75^\circ\text{C}$ je Watt pro Quadratmeter einen globalen Temperaturanstieg von

$$T_{2\text{-CO}_2} = S \cdot \Delta F = 0,75 \cdot 3,7 = 2,8^\circ\text{C}.$$

Derzeit (Ende 2019) beträgt die CO_2 -Konzentration etwa 410 Parts per million. Näherungsweise ergibt sich, selbst bei einem sofortigen Stopp aller durch den Menschen verursachten Klimastörungen, eine Temperaturerhöhung von

$$T_{\text{Zukunft}} \approx S \cdot \Delta F_{2\text{-CO}_2} \cdot \frac{k_{\text{CO}_2(2019)}}{k_{2\text{-CO}_2}} = 0,75 \cdot 3,7 \cdot \frac{410}{556} \approx 2^\circ\text{C}$$

Wie bereits ausgeführt, wird in jedem Fall noch ein weiteres Grad Temperaturerhöhung, resultierend aus der Trägheit der Ozeanreaktionen, eintreten. Das Klimaziel von 2 °C bis 2050 lässt sich daher aus heutiger Sicht mit großer Sicherheit nicht mehr einhalten.

9.2.6.3 Langsam wirkende Klimareaktion

Der Ozean bedeckt 71 % der Erdoberfläche und hat eine gewaltige Ausdehnung und ein enormes Volumen. Die mittlere Höhe der gesamten Landfläche von 29 % der Erde beträgt 685 Meter. Die mittlere Tiefe des Ozeans ist 3.800 Meter. Das Wasservolumen der Ozeane ist circa 6-mal so groß wie das Landvolumen über Meereshöhe. Die Aufnahmekapazität von Wärmeenergie – das Wärmespeichervermögen – der Ozeane ist schier unerschöpflich. Aufgrund ihrer großen Masse verlaufen die Energieaufnahme und die Durchmischung der oberen mit den tieferen Wasserschichten entsprechend langsam. Die Ozeane verhalten sich so, als erinnerten sie sich an vergangene, längst verschwundene Störungen, und reagieren noch lange auf sie.

Neben den schnellen Klimareaktionen der Atmosphäre und der Erdoberfläche tritt eine langsame, verzögernd ablaufende der Ozeane auf. Nachfolgend soll abgeschätzt werden, wie groß die Temperaturänderung ist, die sozusagen noch »in der Pipeline« ist und im nächsten Jahrhundert weiterwirken wird. Neben der Trägheit der Wärmeaufnahme und Wärmeabgabe der Ozeane verzögert die langsame Veränderung der Oberflächenalbedo durch das Wegschmelzen des Meerwassereises, der Gletscher und der Polkappen den Effekt. Ein paläontologischer Blick in die Erdvergangenheit hilft, diesen Effekt abzuschätzen.

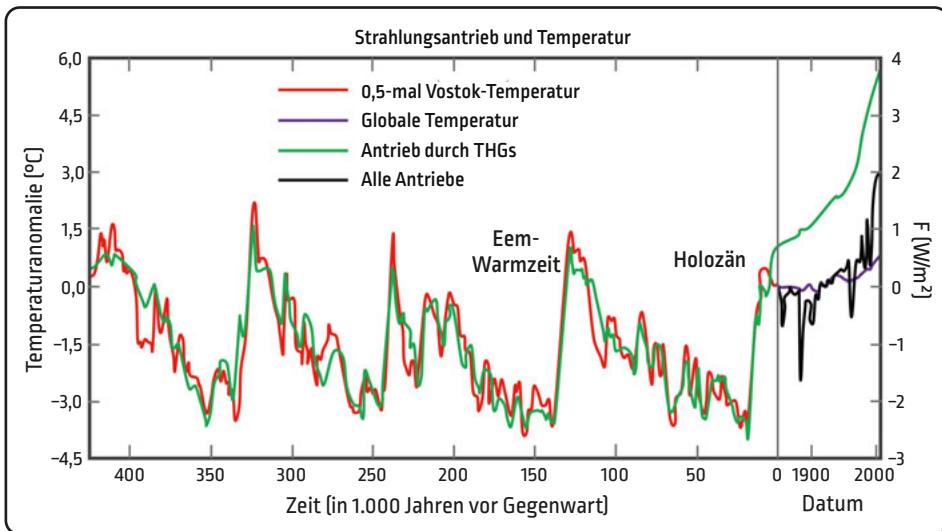


Abbildung 116: Strahlungsantriebe und Temperatur der letzten 425.000 Jahre.

Bekannt sind der Verlauf der Strahlungsantriebe aus Treibhausgasen und die Temperaturen der Vergangenheit, abgeleitet aus Eiskernbohrungen der Antarktis. Die Antarktistemperaturen werden im Diagramm (Abbildung 116) halb so groß angenommen, weil bekannt ist, dass an den Polen wegen der geringeren Sonneneinstrahlung die Temperaturen ungefähr die Hälfte der globalen Erdtemperatur betragen. Rechts ist eine erweiterte Zeitskala für das Industriezeitalter angegeben. Die schwarze Linie entspricht dem gesamten Strahlungsantrieb, grün dem der Treibhausgase, und die violette Linie entspricht dem beobachteten Temperaturanstieg bis 2007.

Vergleicht man die beiden Skalen, links für den Temperaturverlauf ($-4,5$ bis $+6$ °C, also $10,5$ °C Temperaturdifferenz), rechts für den Strahlungsantrieb (-3 bis $+4$ °C entsprechend 7 Watt pro Quadratmeter Antriebsstrahlungsdifferenz), und dividiert diese, dann erhält man für die gesamte Klimasensitivität über lange Zeiträume:

$$S_{\text{Gesamt}} = \frac{\Delta T}{\Delta F} = \frac{10,5^{\circ}\text{C}}{7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}} \approx 1,5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}/\text{m}^2}$$

Für die langsam wirkende Klimasensitivität nach Abzug der kurzfristigen ergibt sich:

$$S_{\text{Lang}} \approx S_{\text{Gesamt}} - S = 1,5 - 0,75 = 0,75 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}/\text{m}^2}$$

Der langfristige wirkende Klimaantrieb ist etwa gleich groß wie der transient beobachtete. Lange nachdem die Menschheit ihre Emissionen und Störungen des Strahlungsgleichgewichts der Erde eingestellt haben wird, wird die Erde ihre Temperatur weiter erhöhen, bevor diese durch natürliche Prozesse wieder zu sinken beginnen wird. Die Folgen des Industriezeitalters werden die Menschheit mit Sicherheit noch das nächste Jahrhundert beschäftigen. Für die schnelle Temperaturerhöhung werden $0,6$ °C und für die langsamen Antriebe (Ozeane, Eisflächen) $1,4$ °C weiterer Temperaturanstieg erwartet. Die Erhöhung der Temperatur durch die in den Ozeanen bereits aufgenommene Wärme wird innerhalb der nächsten 25 Jahre zur Hälfte und in 250 Jahren zu drei Vierteln stattfinden. Das Strahlungsgleichgewicht wird die Erde voraussichtlich in 1.000 Jahren erreichen.

Neben den Ozeanen als Wärmespeicher wirken die großen Eismassen stabilisierend. Zur Erklärung: Solange sich Eis in einem Cocktailglas befindet, stabilisiert das Getränk seine Temperatur konstant bei 0 °C. Diese 0 °C halten so lange an, bis alles Eis geschmolzen ist. Anschließend erwärmt sich der Cocktail und passt sich relativ rasch an die Umgebungstemperatur an.

Ähnlich verhält es sich mit den stabilisierenden Effekten des Meereises, der Gletscher und der eisbedeckten Polkappen. Solange diese vorhanden sind, stabilisieren und verzögern sie den Temperaturanstieg. Das verhindern die erwähnten trägen Kältespeicher. Die Temperaturen der Zwischeneiszeit sind wegen der Eiskappen ausgeglichen und werden durch sie auch während der Eiszeiten in einem engen Tempe-

raturbereich von etwa 5 °C stabilisiert. Sind die Polkappen einmal weggeschmolzen (das Abschmelzen der Antarktis wird positiverweise Tausende von Jahren dauern), bewegt sich die Erde rasant auf eine »Heiße Erde« zu. Verursacht die Menschheit weiter einen Strahlungsantrieb in der aktuellen Größenordnung, kommt es zwangsläufig zu einem nicht mehr aufhaltbaren Prozess des Abschmelzens der Antarktis.

Tabelle 18: Übersicht über die Strahlungsantriebe und die effektive Klimasensitivität.

Komponente	Strahlungsantrieb (W/m ²)	Effektive Klima- sensitivität transient °C/W/m ²	Effektive Klima- sensitivität Gleichgewicht °C/W/m ²
Gut gemischte Treibhausgase (THG)	3,4	0,35	0,71
Aerosole, vom Menschen verursacht	-0,735	0,83	0,93
Landnutzung	-0,113	1,81	0,11
Ozon	0,27	0,53	0,56
Solare Variabilität	0,04	0,35	0,26
Vulkane	-0,044	0,45	0,47
Historisch		0,71	0,71

Tabelle 18 gibt eine Übersicht über die Strahlungsantriebe und die effektiven Klimasensitivitäten. Beim Erreichen des Gleichgewichts sind die Ozeane durchmischt und die durch die Strahlungsantriebe indirekt ausgelösten Rückkopplungen abgeklungen. Die transiente Klimasensitivität ist die globale Temperaturerhöhung zum Zeitpunkt der gemessenen doppelten CO₂-Konzentration in der Erdatmosphäre und beschreibt die schnelle Klimaantwort.

9.3 Ursprung und Verursacher des Treibhausgases CO₂

9.3.1 CO₂ – und globaler Kohlenstoffkreislauf

Das CO₂-Gas stellt in der Atmosphäre die wichtigste Komponente im globalen Kohlenstoffkreislauf dar. Ein Bestandteil dieses Kreislaufs ist der gespeicherte Kohlenstoff im Erdsystem – in den Ozeanen in Bodensedimenten, an Land in der Lithosphäre und den Pflanzen. Die Permafrostböden und fossilen Brennstoffe in der Form von Erdöl, Erdgas und Kohle speichern eine riesige Menge Kohlenstoff. Zwischen diesen Reservoiren kommt es zu Austauschflüssen. Die Zeiten und Mechanismen des Kohlenstoffaustausches – Freisetzung, Aufnahme und Bindung – sind extrem unterschiedlich und reichen von Jahren bis zu Jahrtausenden. Kohlenstoff, der im Boden und in

den Pflanzen gebunden ist, braucht zum Austausch (Wachstum/Zerfall) Jahrzehnte bis Jahrhunderte. Die riesigen Kohlenstoffmengen, die durch Verwitterung, Erosion oder Sedimentbildung am Ozeanboden abgelagert werden, benötigen Zeiträume von 10.000 Jahren und mehr. Das CO₂ der Luft wird durch Gasaustausch mit dem Oberflächenwasser der Ozeane gelöst und bindet sich im Wasser als Kohlensäure (H₂CO₃), das teilweise chemische Bindungen in Form von Karbonaten eingeht. In Lebewesen wird Kohlenstoff in Form organischer Verbindungen gebunden. Ein Teil des Kohlenstoffs findet sich in abgestorbener organischer Substanz in Böden oder im Permafrost.

Kohlenstoffdioxid wird durch Pflanzen mithilfe der Photosynthese aus der Atmosphäre aufgenommen, in Pflanzengewebe und Wachstum umgewandelt und nach dem Absterben der Pflanzen über Zerfall und Zersetzung wieder dem Kreislauf zugeführt. Die Photosynthese erfolgt nur während der Vegetationszeit. Die Landmasse der nördlichen Hemisphäre liefert daher einen charakteristischen sägezahnförmigen CO₂-Verlauf im Jahresrhythmus.

9.3.1.1 Globaler Kohlenstoffhaushalt

Eine genaue Bewertung der durch den Menschen verursachten Kohlendioxidemissionen und ihrer Umverteilung in der Atmosphäre, den Ozeanen und der Biosphäre ist für ein Verständnis des globalen Kohlenstoffkreislaufs wichtig.

Abbildung 117 zeigt quantitativ die aktuellen Kohlenstoffmengen in Gigatonnen Kohlenstoff (Gt C). 1 Gigatonne Kohlenstoff sind 1.000.000.000 Tonnen, die zwischen

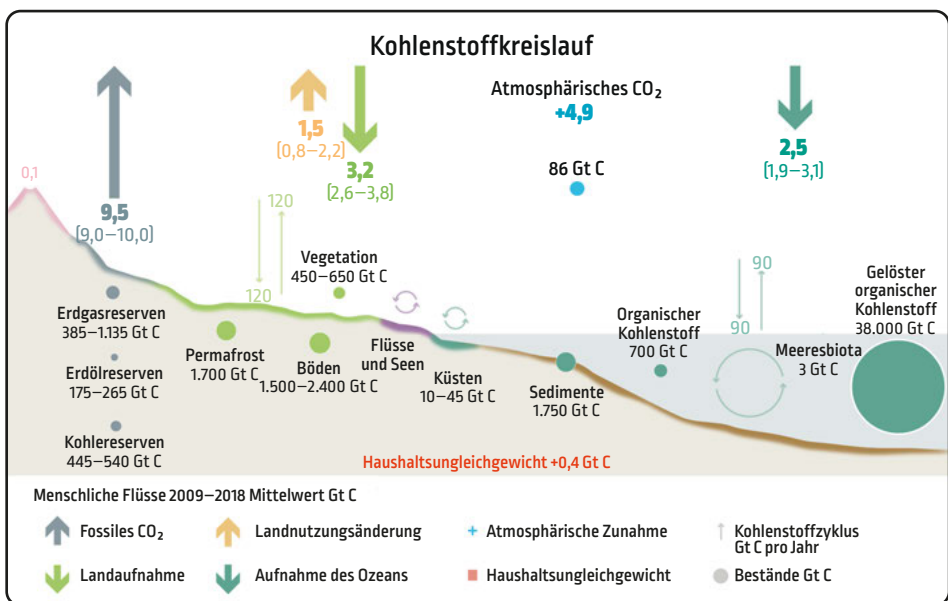


Abbildung 117: Kohlenstoffkreislauf (Flüsse in Gigatonnen pro Jahr).

Boden, Luft und Ozean pro Jahr ausgetauscht werden bzw. abgespeichert sind. Der Anteil des CO₂ in Parts per million in der Atmosphäre kann wie folgt in Masse umgerechnet werden:

$$1 \text{ ppm CO}_2 = 2,124 \text{ Gt C}$$

Derzeit werden 86 % der Gesamtemissionen von CO₂ durch Verbrennung fossiler Brennstoffe und 14 % durch Landnutzungsänderungen erzeugt. Diese Gesamtemissionen verteilen sich auf die Atmosphäre (46 %), den Ozean (24 %) und das Land (30 %). Mit Ausnahme der Landnutzungsänderungen, die in etwa gleich bleiben, nehmen die anderen Komponenten stetig zu. Die natürlichen Komponenten des Kohlenstoffkreislaufes wirken auf verschiedenen Zeitskalen.

Die Zusammenstellung im Diagramm (Abbildung 118) zeigt die Gesamtmenge an eingebrachtem Kohlenstoff in den Kreislauf durch den Menschen. Über den Zeitraum von 1850 bis 2018 (170 Jahre) haben Kohle, Erdöl und Landnutzung etwa gleich große Anteile. Links im Diagramm werden die Stoffflüsse pro Jahr dargestellt. Der Anteil durch Landnutzungsänderungen stagniert, während jener aus Kohle und Erdöl zunimmt. Die Verbrennung von Erdgas weist große Steigerungsraten auf.

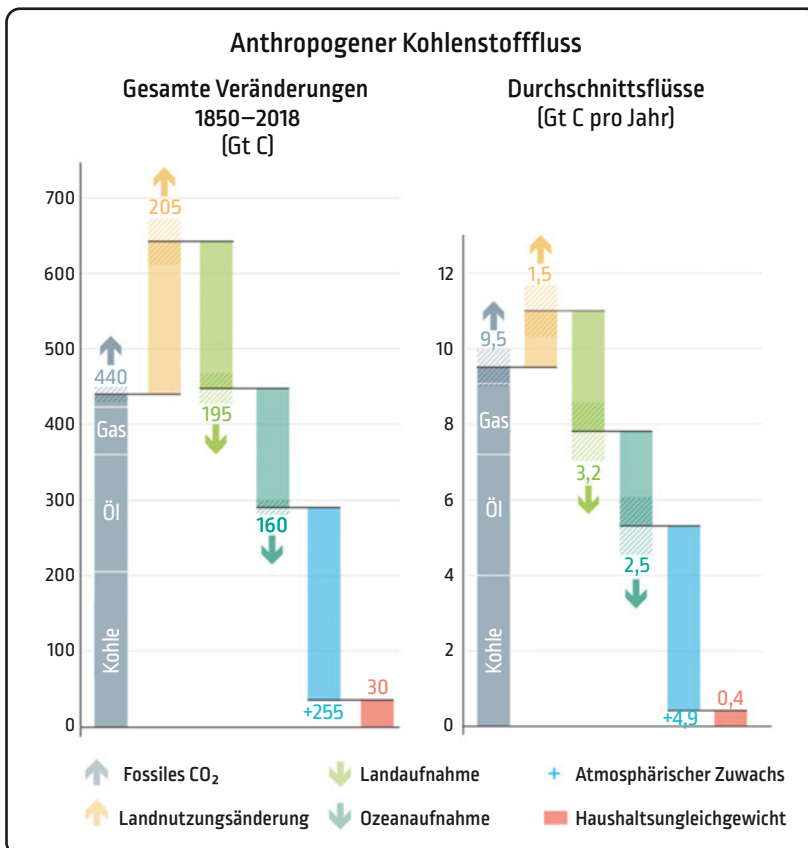


Abbildung 118: Gesamteinbringung von CO₂ in Gigatonnen C in den Kohlenstoffkreislauf und durchschnittliche jährliche Kohlenstoffflüsse für den Zeitraum 1850 bis 2018.

Tabelle 19: Zeitskalen für die Entfernung eines durch die Menschheit eingebrachten CO₂-Impulses durch natürliche ablaufende Prozesse.

Prozess	Zeitskala (Jahre)	Chemische Reaktionen
Landnutzungsänderung Photosynthese Atmung	1–100	$6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} + \text{Licht} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$ $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2 \rightarrow 6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} + \text{W\u00e4rme}$
CO ₂ -Aufnahme des Ozeans	10–1.000	$\text{CO}_2 + \text{CO}_3^{2-} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow 2\text{HCO}_3^-$
Bindung des CO ₂ in Meeresbodensedimenten	1.000–10.000	$\text{CO}_2 + \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$
CO ₂ -Bindung durch Silikatverwitterung	10.000–1 Mio.	$\text{CO}_2 + \text{CaSiO}_3 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2$

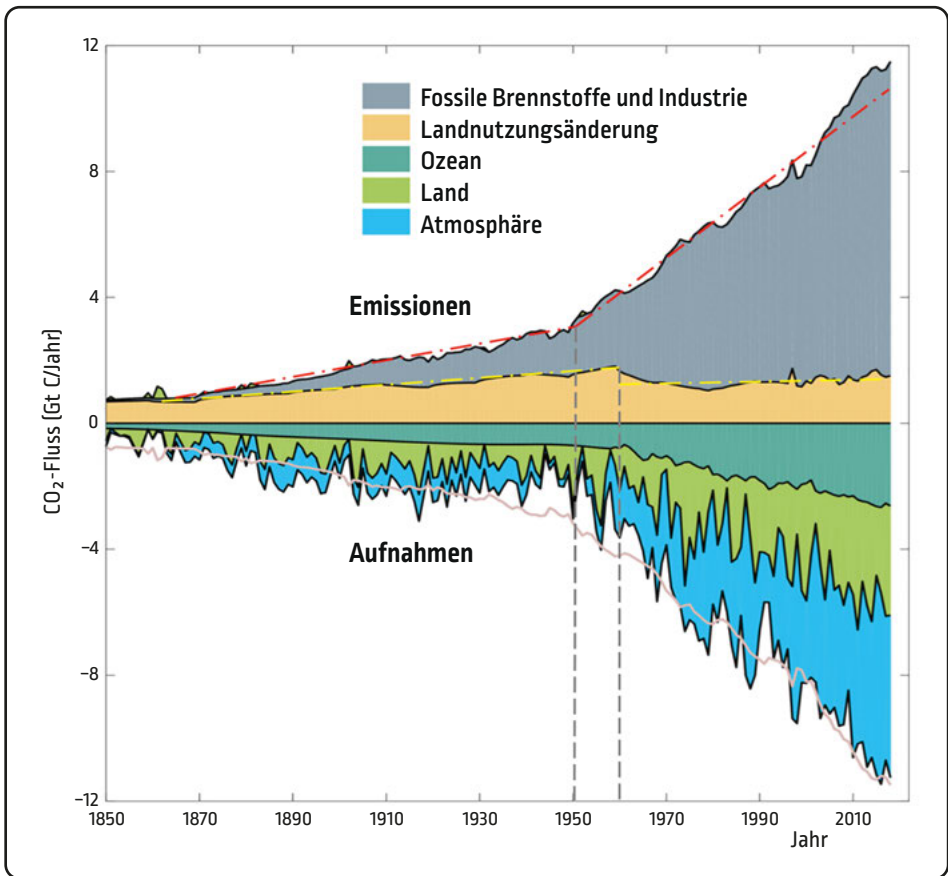


Abbildung 119: CO₂-Flüsse nach Emissionen und Aufnahmen über den Zeitraum 1850 bis 2018.

Abbildung 119 zeigt ab 1950 bei den Emissionen einen progressiven Anstieg. Die zunehmende Anzahl an Autos und das Wirtschaftswunder schlugen sich als erhöhter Energiebedarf und Verbrauch nieder. Bis etwa 1960 wurden Landflächen agrartechnisch großräumig erschlossen, seither bleiben die damit verbundenen jährlichen Emissionen weitgehend konstant. Die Verbrennung fossiler Brennstoffe stieg seit 1950 stark an und nimmt seither weiter zu. Entsprechend den in den Kreislauf eingebrachten Emissionen und den darauffolgenden Klimaänderungen haben die natürlichen Gegenspieler wie die Ozeane, die Atmosphäre und das Land darauf durch vermehrte Aufnahme von CO₂ reagiert, es kam zu Klimaänderungen, und es hat sich insgesamt noch kein Gleichgewicht eingestellt.

9.3.2 Kohlenstoffemissionen

Hauptverursachend für den hohen anthropogenen Emissionsbeitrag der Treibhausgasemissionen in die Atmosphäre ist die Verbrennung fossiler Brennstoffe durch Kohlekraftwerke, das Heizen von Gebäuden, Pkws und Lkws, Flugzeuge und Schiffe, die Landnutzung und Landnutzungsänderungen, reduzierte Kohlenstoffsenken und zunehmend Waldbrände. Im Jahr 2019 wurden insgesamt 36,8 Gigatonnen CO₂ (entspricht 10 Gigatonnen Kohlenstoff) emittiert.

ZUSATZINFORMATION

Aus dem Blickwinkel der Treibhauswirkung der emittierten Gase in die Atmosphäre wird häufig die CO₂-Menge genommen. Wird der gesamte Kohlenstoffhaushalt der Erde betrachtet, ist der Gebrauch der Kohlenstoffmenge sinnvoller, weil das Kohlendioxid chemisch in andere Kohlenstoffverbindungen übergeführt wird. Für den Kohlenstoffhaushalt ist es wichtig zu wissen, wie viel des Kohlendioxids durch den Ozean aufgenommen und in Sedimenten abgelagert wird, wie viel davon Pflanzen absorbieren und wie viel sich in den Gesteinen ablagert etc. CO₂ hat zusätzlich zum Kohlenstoffatom zwei Sauerstoffatome, das vergrößert seine Molmasse. Die Umrechnung der Massen erfolgt nach der folgenden Beziehung:

$$m_{CO_2} = 3,664 \cdot m_C$$

Tabelle 20: Prozentuale Aufteilung der CO₂-Emissionen in % der Gesamtmenge [2018].

Emittent CO ₂	% der Gesamtmenge	Emittent CO ₂	% der Gesamtmenge
Kohleverbrennung	38,9	Zementherstellung	7,3
Erdölverbrennung	33,1	Abfackeln von Begleitgasen	0,7
Erdgasverbrennung	20,0		

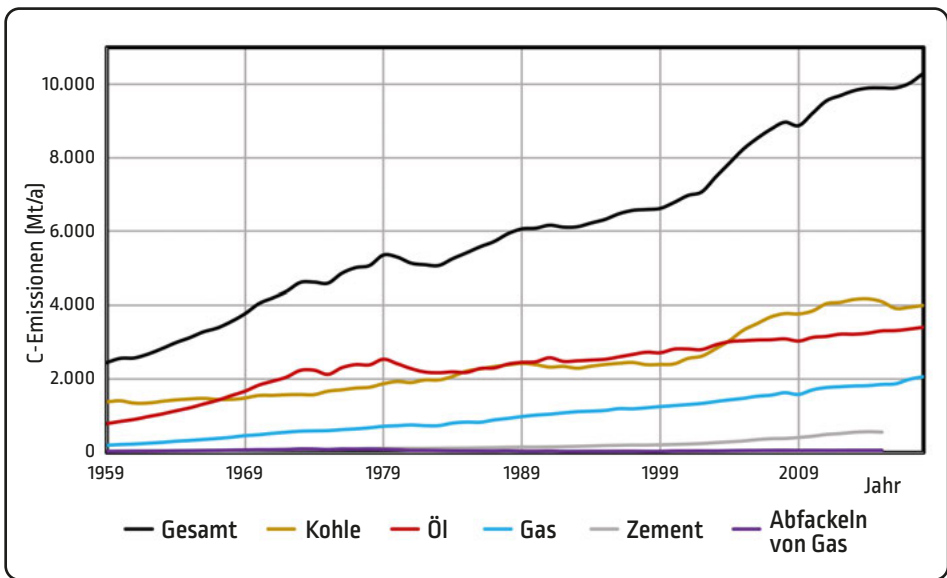


Abbildung 120: Kohlenstoffemissionen pro Jahr nach Herkunft.

Abbildung 120 zeigt die Verteilung der CO₂-Emissionen nach deren Herkunft. Die Verbrennung von Kohle zur Energiegewinnung ist vor Öl der größte CO₂-Emittent. Nach dem Erdgas folgt der CO₂-Anteil aus der Zementproduktion und dem Abfackeln der Begleitgase bei der Erdölgewinnung.

Die Emissionen aus der Kohleverbrennung stiegen 2018 um 1,4 %, jene aus der Ölverbrennung um 1,2 %, die aus Erdgas um 5,4 % und jene aus der Zementherstellung um 2,1 %.

9.3.3 Globale Emissionen von Treibhausgasen nach Wirtschaftssektoren

Mit 25 % der Verbrennung von Kohle, Erdgas und Öl zur Erzeugung von Elektrizität und Wärme ist der Sektor Strom und Heizung der größte Emittent von Treibhausgasen (siehe Abbildung 121). An zweiter Stelle rangieren die Landwirtschaft, Forstwirtschaft und andere Arten der Landnutzung. Sie tragen 24 % zum globalen Ausstoß bei – Anbau von Pflanzen, Aufzucht von Tieren und Entwaldung. Den drittgrößten Beitrag liefert die Industrie – chemische, metallurgische und mineralische Prozesse und Emissionen aus der Abfallwirtschaft.

14 % der weltweiten Treibhausgasemissionen entspringen dem Verkehr durch Verbrennung erdölbasierter Kraftstoffe, hauptsächlich Benzin und Diesel. Der Sektor Sonstige Energie umfasst Emissionen aus dem Energiesektor, die nicht direkt mit der Strom- oder Wärmeerzeugung in Verbindung stehen, z. B. Raffinierung, Verarbeitung und der Transport von Brennstoffen.

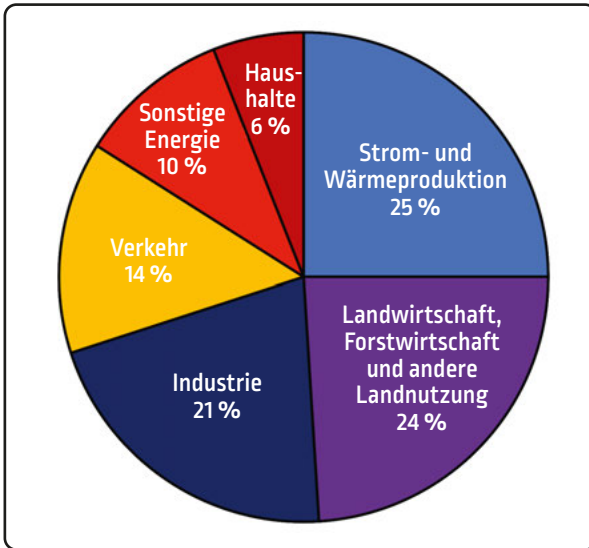
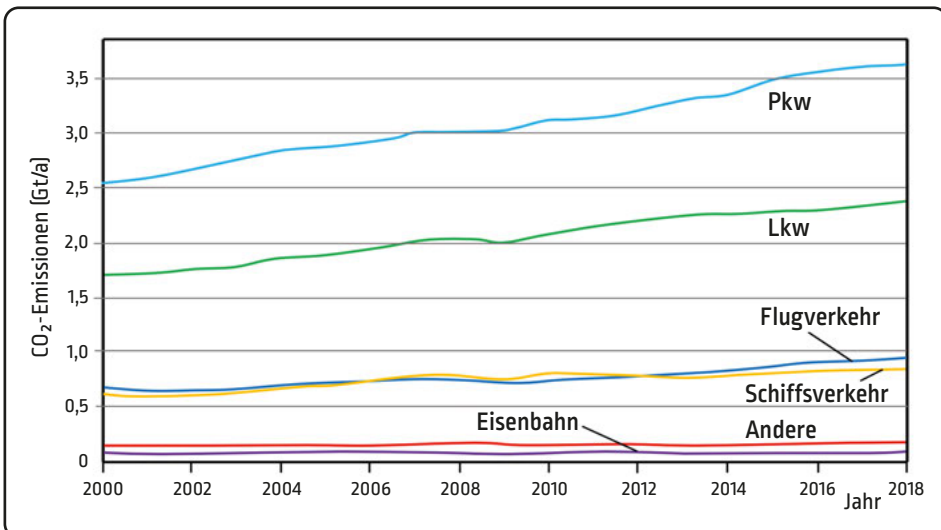


Abbildung 121: Globale Emissionen von Treibhausgasen nach Wirtschaftssektoren (die Zahlen beziehen sich auf 2010).

9.3.4 CO₂-Emissionen durch Verkehrsträger

Wie aus der Abbildung 122 ersichtlich, liefert der Individualverkehr den größten Beitrag an CO₂, gefolgt vom Schwerlastverkehr auf der Straße. Der Flugverkehr liegt knapp vor dem Schiffsverkehr. Die Eisenbahn ist das umweltfreundlichste Verkehrsmittel und weist die beste CO₂-Bilanz auf. Pkws waren für 3,6 Gigatonnen CO₂, Lkws für 2,4 Gigatonnen CO₂, der Flugverkehr für 0,9 Gigatonnen CO₂, der Schiffsverkehr für 0,8 Gigatonnen CO₂ und der Eisenbahnverkehr für nur 0,1 Gigatonnen CO₂ 2018 verantwortlich.

Abbildung 122: CO₂-Emissionen nach Verkehrsträger [Gigatonnen pro Jahr].



9.3.5 CO₂-Emissionen durch Zementproduktion

2019 wurden 4,65 Milliarden Tonnen Zement hergestellt und verbaut. Bis 2050 wird mit einem weiteren Anstieg von 20 % gerechnet. Pro Tonne Zement werden durchschnittlich 590 Kilogramm CO₂ ausgestoßen.⁵² Vor allem die Schwellenländer China, Indien und Indonesien benötigen für Infrastrukturprojekte viel Beton. Seit den 1980ern steigt der Bedarf deshalb kontinuierlich. China ist mit derzeit 52 % Weltmarktanteil der absolut größte Verbraucher. Das Land durchlebt gerade die rasanteste Urbanisierung seiner Geschichte. In den nächsten Jahrzehnten werden mehr als 400 Millionen Menschen vom Land in die Städte ziehen. Parallel zu China laufen nachelend in Indien ähnliche Entwicklungen ab.

Wie entsteht CO₂ bei der Zementproduktion? Ein Gemisch aus Kalkstein (Kalziumkarbonat CaCO₃), Ton, Sand und Eisenerz wird pulverisiert und auf 1.450 °C erhitzt. Bei diesem Prozess (Umwandlung von Kalkstein zu Zementklinker) wird CO₂ freigesetzt, es entsteht Kalziumoxid (CaO). Diese chemische Reaktion erzeugt 61% der Emissionen. Weitere entstehen durch den Energieaufwand. Aber das ist nur eine Seite der Medaille. Die Landfläche der Erde ist heute durch ein Straßennetz mit 36 Millionen Kilometern parzelliert. Nur 7 % der Erdoberfläche weisen zusammenhängende Gebiete mit mehr als 100 Quadratkilometer Größe auf. Der Rohstoff Sand wird knapp. Für die riesigen benötigten Mengen werden Küstengebiete und Inseln mit noch nicht genau vorhersehbaren Folgen abgebagert.

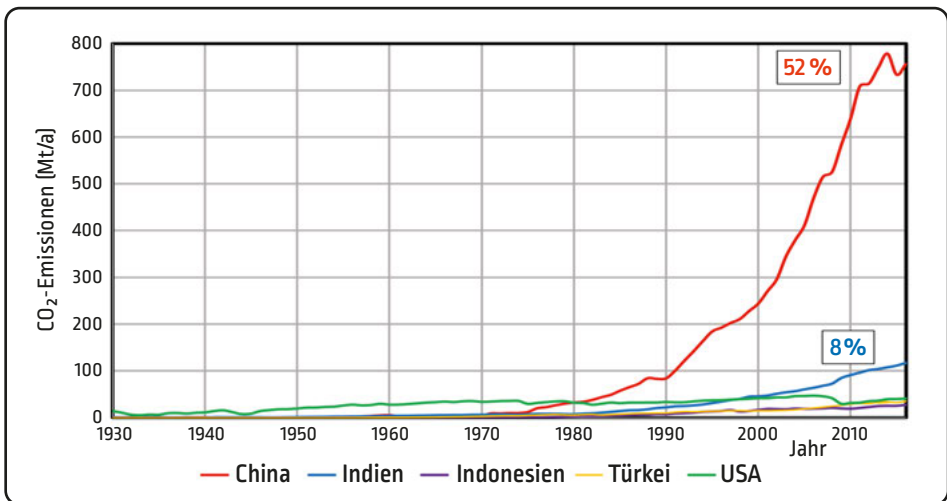


Abbildung 123: Chronologische Entwicklung der CO₂-Emissionen durch Zementproduktion der fünf größten Produzenten von 1930 bis 2016.

⁵² WWF Deutschland (2019): Klimaschutz in der Beton- und Zementindustrie, Berlin.

Abbildung 123 zeigt die chronologische Entwicklung der CO₂-Emissionen durch die Zementproduktion von 1930 bis 2016 der fünf größten Verbraucher. 1980 überschritt die hergestellte Zementmenge Chinas jene der USA, des bis dahin führenden Produzenten.

9.3.6 CO₂-Emissionen aus Land- und Forstwirtschaft und anderer Landnutzung

Die Landwirtschaft, die Forstwirtschaft und andere Landnutzungsarten spielen eine zentrale Rolle für die Ernährungssicherheit. Pflanzen nehmen Kohlendioxid aus der Atmosphäre und Stickstoff aus dem Boden auf und verteilen sie über ober- und unterirdische lebende Biomasse, abgestorbene Rückstände und organische Substanzen im Boden. Treibhausgase wie CO₂, Methan, Lachgas und andere werden durch die Pflanzenatmung, durch die Zersetzung abgestorbener Pflanzen und Bodensubstanz sowie durch Verbrennung wieder in die Atmosphäre freigesetzt.

Die Bewirtschaftung von Äckern, Wäldern, Grasland und Feuchtgebieten, die Umwandlung von Wald- und Grasland in Acker- und Weideland sowie die durch Aufforstung verursachten Veränderungen überlagern sich den natürlichen Stoffflüssen; sowohl CO₂-Quellen als auch CO₂-Senken werden beeinflusst. Aus Viehzucht und Reisanbau entstehen Methanemissionen, Lachgas entweicht aus der Lagerung von Dung, aus landwirtschaftlichen Böden und durch Verbrennen von Biomasse. Wälder enthalten durch das Wachstum der Bäume und Zunahme des Bodenkohlenstoffs einen großen Teil des auf dem Land gespeicherten Kohlenstoffs. Sie sind ein sehr wichtiger Kohlenstoffspeicher. Die weltweite Waldvegetation speichert 283 Gigatonnen Kohlenstoff in ihrer Biomasse, 38 Gigatonnen Kohlenstoff in Totholz und 317 Gigatonnen Kohlenstoff in Böden. Die zunehmenden Waldbrände sind eine erschreckende Entwicklung, da sie bisher sicher gespeicherten Kohlenstoff freisetzen.

Der gesamte Beitrag der Agrarwirtschaft zur Emission von Treibhausgasen beträgt weltweit 5 Gigatonnen CO₂-Äquivalent pro Jahr. Aus Landnutzungsänderungen entstehen jährlich 4 Gigatonnen CO₂-Äquivalent pro Jahr. Dies entspricht in Summe 9 Gigatonnen CO₂ und damit 24 % des weltweiten Treibhausgasausstoßes. Alleine die Entwaldungsvorgänge verminderten 2011 die CO₂-Senke um -2,1 Gigatonnen CO₂-Äquivalent pro Jahr.

9.3.7 CO₂-Emission aus der Gewinnung elektrischer Energie aus fossilen Brennstoffen

In Verbrennungskraftwerken wird Kohle oder Erdgas verbrannt, heißer Dampf erzeugt und damit eine Turbine angetrieben, die mit einem Elektrogenerator verbunden ist und elektrischen Strom generiert. Die elektrische Spannung wird hochtransformiert – höhere Spannungen bedeuten geringere Leitungsverluste (Hochspannungs-



Abbildung 124: Kohlekraftwerk Großkrotzenburg, Hessen, Deutschland.

leitungen) bei der Stromübertragung. Der Turbinendampf wird nach der Energieerzeugungsstufe in einem Kondensator abgekühlt, und das Wasser wird in den Kreislauf rückgespeist. Der Kondensator selbst muss gekühlt werden – einem nahen Fluss wird kaltes Wasser entzogen und das erwärmte Wasser wieder in den Fluss rückgeführt, was das Flussbiom belastet.

Bei Kohlekraftwerken wird Kohle zu Staub zermahlen und in den Brennraum ein-geblasen, über dort verlegte Rohre wird Dampf erzeugt, und damit werden Dampfturbinen angetrieben. Die Heizgase (CO_2) werden über Entstickungs- (NO_x -Reduktion um 70 %), Entstaubungs- (Entfernung Aerosole, Ruß über elektrostatische Filter) und Entschwefelungsanlagen (SO_2 -Reduktion um 90 %) in die Atmosphäre geblasen. Zur Verfeuerung werden Braunkohle und Steinkohle eingesetzt.



Abbildung 125: Braunkohleabbau Turów in Polen.

Der Abbau von Braunkohle erfolgt im Tagebau und reißt riesige Wunden in die Landschaft – ganze Dörfer werden geschliffen und Wälder gerodet.⁵³

Bei Heizkraftwerken wird die entstehende Abwärme genutzt (oft auch als »Kraft-Wärme-Kopplung« bezeichnet). Sie heizen öffentliche Gebäude und Wohnhäuser. Der Vorteil liegt im höheren Wirkungsgrad (bessere Nutzung der fossilen Heizenergie) und im geringeren Kühlwasserbedarf.

⁵³ <https://www.alle-doerfer-bleiben.de/aktionen/>, abgerufen am 17.9.2020.

9.3.8 Fossiler Brennstoff Kohle

Es gibt verschiedene Kohlequalitäten. Aus globaler Sicht spielt Braunkohle gegenüber Steinkohle eine untergeordnete Rolle.⁵⁴ In Deutschland hingegen ist sie nach wie vor Spitzenreiter – für 45 (2017) in Betrieb befindliche Braunkohlekraftwerke ist sie der primäre Rohstoff. Kohlekraftwerke sind die Hauptquelle des klimaschädlichen CO₂. Die Emissionen der vorhandenen Kraftwerke reichen aus, die Erderwärmung um 1,5 °C zu steigern.

ZUSATZINFORMATION

Wie entsteht Kohle, und was ist der Unterschied zwischen Braun- und Steinkohle?

Kohlen sind brennbare Sedimentgesteine, die über Jahrmillionen unter Luftabschluss aus organischem Material entstanden sind. Torf ist das Material mit dem geringsten Kohleanteil und dem niedrigsten Heizwert.

Je weiter der Prozess der Inkohlung fortgeschritten ist, umso reiner liegt Kohlenstoff vor, und umso höher sind die Heizwerte. Je niedriger der Kohlenstoffgehalt, umso niedriger der Heizwert und umso höher die Verunreinigungen. Der Kohlegehalt von Steinkohle ist höher als jener von Braunkohle, Steinkohle weist weniger Verunreinigungen auf, die während des Verbrennungsprozesses frei werden und die Umwelt belasten.

2018 nahmen – verglichen mit 2017 – 20 % weniger Kohlekraftwerke ihre Produktion auf. Um 39 % sank die Zahl der Neubauten. Die klimaschädliche Kohle ist auf dem Rückzug. Die Zahl der weltweit geplanten Kohlekraftwerke ist 2018 das dritte Mal in Jahresfolge zurückgegangen – insgesamt eine positive Entwicklung.

Der Erdgasverbrauch stieg 2018 um 5,3 % und der Kohleverbrauch um 1,4 %. Der OECD-Verbrauch fiel auf den niedrigsten Kohleverbrauchswert seit 1975 (China und Indien sind keine OECD-Mitglieder).

Tabelle 21: Heizwert, flüchtige Bestandteile und Kohlenstoffanteil der verschiedenen Kohlearten.

Kohlenart	Heizwert [GJ/t]	Flüchtige Bestandteile [%]	Kohlenstoffanteil [%]
Brenntorf	14	70–80	5–8
Braunkohle	7–15	43–60	65–75
Steinkohle	30–36	10–40	75–92
Anthrazit	35	<10	>92

⁵⁴ Umweltbundesamt Deutschland (2017): Daten und Fakten zu Braun- und Steinkohlen, Fachgebiet I 2.5, ISSN 2363-829X.

Tabelle 21 fasst die Eigenschaften verschiedener Kohlearten zusammen. Der Heizwert von Braunkohle liegt um die Hälfte unter der von Steinkohle und weist einen viel größeren Anteil unerwünschter flüchtiger Bestandteile auf. Anthrazit ist die hochwertigste Kohle und besteht aus beinahe reinem Kohlenstoff.

ZUSATZINFORMATION

Das Ziel der OECD (Organisation for Economic Cooperation and Development) ist die Koordination der Wirtschafts-, Handels- und Entwicklungspolitik der 36 Mitgliedsländer. Die Politik soll Wirtschaftswachstum, Vollbeschäftigung, Preisstabilität und steigenden Lebensstandard fördern. Die OECD berät Regierungen, erstellt Leitlinien und Statistiken und sucht nach Regeln für die Globalisierung. Kritisiert werden die Beschränkung auf den »Club der reichen Staaten« und der mangelnde Einfluss der OECD. Beschlüsse und Empfehlungen werden im Konsens getroffen. Die Urmitglieder (beigetreten 1961 bis 1969) sind Österreich, Belgien, Kanada, Dänemark, Frankreich, Deutschland, Griechenland, Großbritannien, Island, Irland, Luxemburg, Niederlande, Norwegen, Portugal, Spanien, Schweden, Schweiz, Türkei und die USA. Zwischen 1971 und 1996 folgten die Australien, Neuseeland, Mexiko, Tschechien, Ungarn, Südkorea, Polen und die Slowakei. Die jüngsten Mitglieder (seit 2010) sind Chile, Estland, Israel, Slowenien, Lettland und Litauen.

Warum ist der Brennstoff Kohle so attraktiv? Der Brennstoffpreis für Braunkohlenstaub liegt deutlich unter dem Preis für Erdgas oder Heizöl. Steinkohle wird weltweit gehandelt und in großem Ausmaß gefördert, und die Preise sinken.

ZUSATZINFORMATION

Der EU-Emissionshandel von CO₂-Zertifikaten hat zum Ziel, die Treibhausgasemissionen unter möglichst geringen volkswirtschaftlichen Kosten zu senken. Jeder Betrieb einer Anlage muss für jede Tonne emittiertes CO₂ ein gültiges Zertifikat vorlegen. Ein Teil der Zertifikate wird durch den Kommissar für Klimaschutz kostenlos zugeteilt. Zertifikate sind handelbar, überschüssige Zertifikate können verkauft werden. Zertifikate können auch von Betreibern außerhalb des EU-Raumes erworben werden.

Am 30.5.2020 lag der Preis für die europäischen CO₂-Emissionsberechtigungen bei 25,15 Euro pro Tonne CO₂. Damit bleibt die Stromerzeugung aus modernen Steinkohlekraftwerken betriebswirtschaftlich kostengünstiger als die Stromerzeugung aus effizienteren Erdgaskraftwerken oder alternativen Stromerzeugern. Durch die Verbrennung von Kohle werden Luftschadstoffe wie Schwefeldioxid, Lachgas, Stickoxide, Staub und Schwermetalle (Blei, Quecksilber, Kadmium, Arsen) und andere Verun-

reinigungen in die Umwelt eingebracht. Der Abbau von Kohle erzeugt gravierende zusätzliche Umweltprobleme und Folgekosten. Belastend ist die Abdichtung der Berghalden, um das Grundwasser zu schützen. Absinkender Boden führt zu erheblichen Schäden an Gebäuden und Verkehrsanlagen. Risiken sind auch Überschwemmungen, die mit Deichen und der Installation von Pumpen verhindert werden müssen. Zur Kühlung der Kraftwerke werden große Mengen Wasser benötigt. Die Abfuhr des erwärmten Wassers stresst die Lebenswelt der Flüsse.

9.3.9 Fossiler Brennstoff Erdöl

Amerika ist mit Abstand der größte Konsument von Erdöl, gefolgt von China und Indien. Entgegen der notwendigen Reduktion des Erdölverbrauches ist der Verbrauch der Welt an Erdöl 2018 um 220 Millionen Liter pro Tag gestiegen. Der weltweite tägliche Verbrauch lag damit auf der Weltrekordhöhe von 16 Milliarden Liter. Die Treiber der täglichen Verbrauchssteigerung sind China (49 %) und die USA (36 %). Weltweit stieg der Ölverbrauch beständig, allein in den letzten 25 Jahren um 35 %.

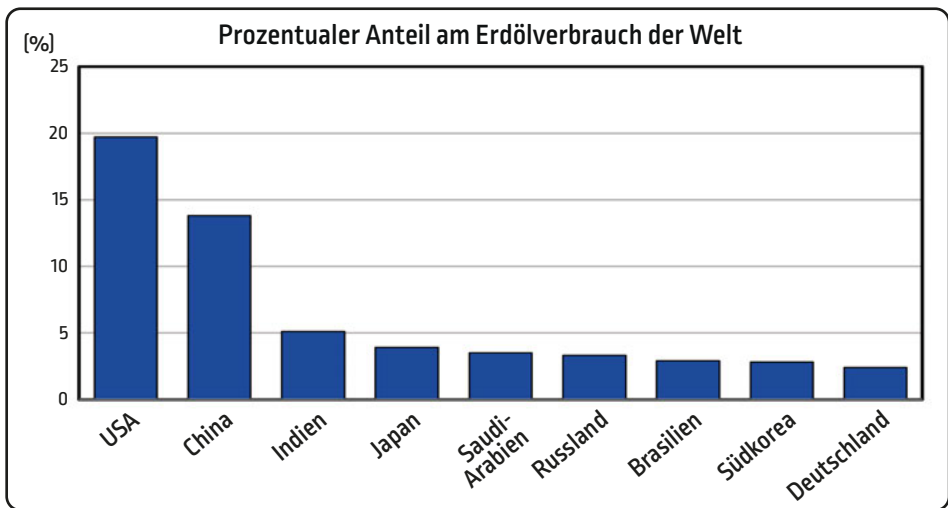


Abbildung 126: Die neun größten Erdölkonsumenten (Angabe in % des Erdölverbrauchs der Welt).

9.3.10 Globale Emissionen von Treibhausgasen, aus fossilen Brennstoffen stammend, nach Herkunftsländern

Das Land mit den größten Treibhausgasemissionen aus fossilen Brennstoffen ist 2014 China, gefolgt von den USA, Europa und Indien (siehe Abbildung 127, links). Es sind China und Indien und die hoch industrialisierten Länder der nördlichen Hemisphäre wie die USA, die EU, die Russische Föderation und Japan, die den Planeten belasten.

Der Rest der Welt verursacht nur 30 % der Treibhausgasemissionen, insbesondere Länder der Dritten Welt verursachen die geringsten Emissionen und tragen am wenigsten zur Umweltverschmutzung bei. Ungerechterweise sind diese Länder aufgrund ihrer geografischen Lage am stärksten vom Klimawandel betroffen.

Unten in der Abbildung 127 werden die größten Emittenten von CO₂ angezeigt: an der Spitze China, gefolgt von den USA, der EU28 und Indien. Die Mengen entsprechen 59 % der weltweiten Emissionen.

Abbildung 128 zeigt den enormen Energieverbrauch im asiatischen Raum. China gefolgt von Indien erzeugen den Großteil ihrer Energie in Kohlekraftwerken.

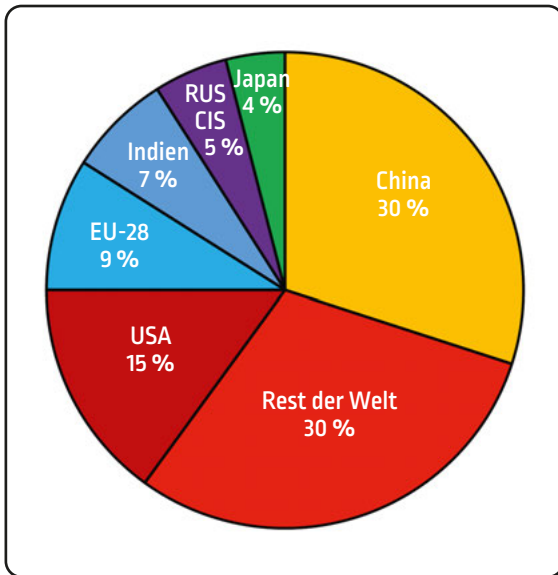
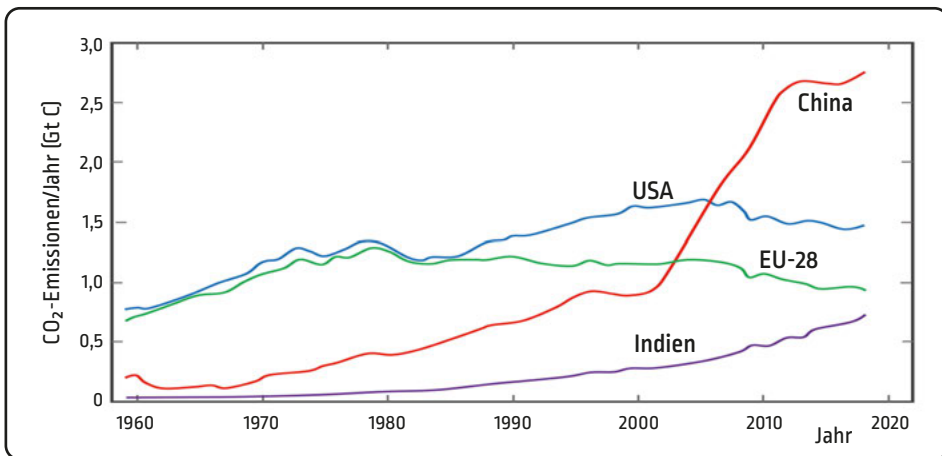


Abbildung 127: oben: Globale Emissionen von Treibhausgasen, aus fossilen Brennstoffen stammend, nach Herkunftsländern (die Zahlen beziehen sich auf 2014); unten: CO₂-Emissionen in Gt C pro Jahr nach Ländern (durchgezogene Linien: gebietsbezogen; punktierte Linien: verbrauchsbezogen).



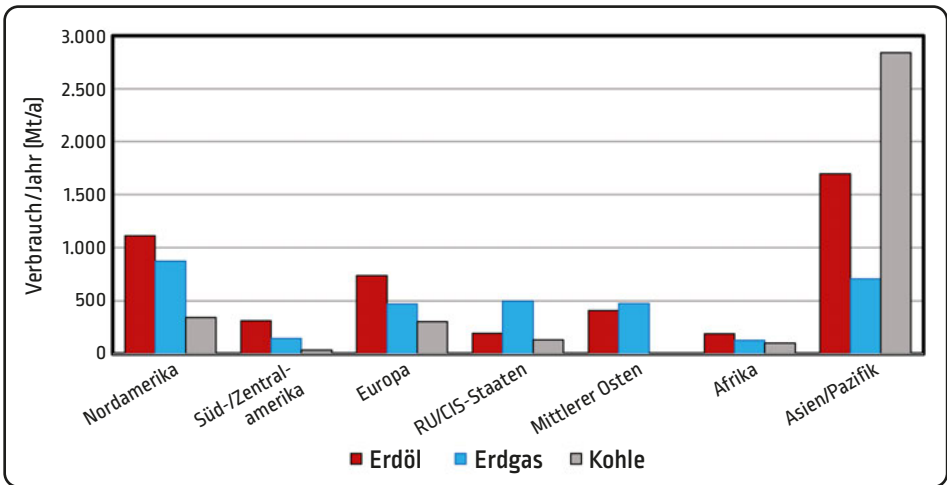


Abbildung 128: Verbrauch fossiler Energieträger 2018 nach Herkunft.

9.3.11 Spitzenverbraucher/Einwohner

Die pro Kopf größten Emittenten von CO₂ sind mit Abstand die US-Amerikaner, gefolgt von Europäern, Chinesen und Indern. Die reichen Länder sind die Hauptverursacher des Klimawandels. Sie lagerten bereits in der Vergangenheit ein Übermaß an Treibhausgasen in der Atmosphäre ab. China trägt erst seit den letzten Dezennien zur Umweltverschmutzung bei.

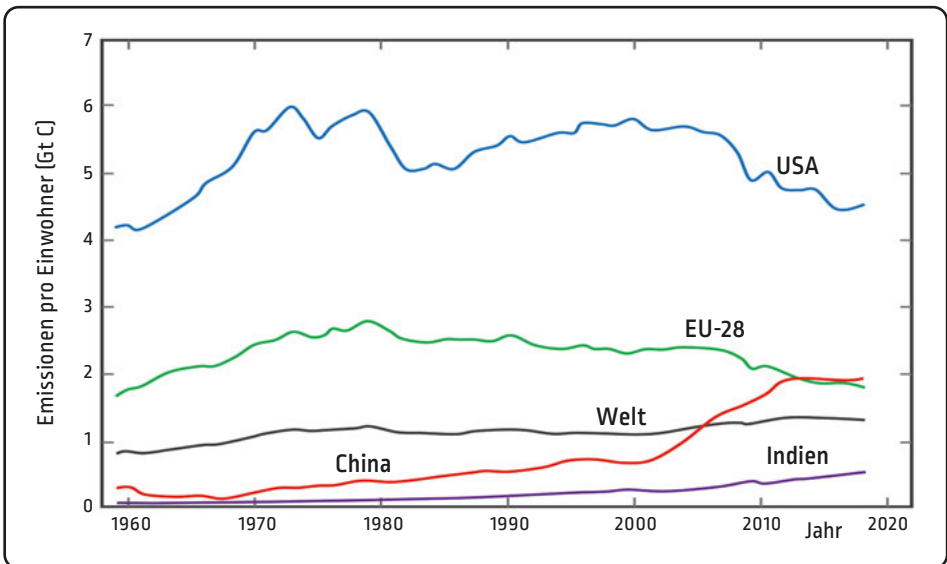


Abbildung 129: CO₂-Emissionen pro Einwohnerzahl und Jahr.

9.3.12 Weltweit größte Förderer und Verbraucher fossiler Brennstoffe⁵⁵

Die weltweiten Emissionen von fossilen Brennstoffen und Zement beliefen sich von 1965 bis 2018 auf insgesamt 1.354 Milliarden Tonnen (das entspricht 1,354 Teratonnen) Kohlendioxid.

Tabelle 22: Top-20-Unternehmen, die durch die Verbrennung ihrer Produkte zur Klimakrise beitragen (in Teratonnen CO₂-Äquivalenten).

Rang	Unternehmen	Tt CO ₂ e	% global	Land	Eigentümer
1	Saudi Aramco	59,3	4,4	Saudi-Arabien	Staat
2	Chevron	43,3	3,2	USA	Privat
3	Gazprom	43,2	3,2	Russland	Staat (50 %)
4	ExxonMobil	41,9	3,1	USA	Privat
5	National Iranian Oil Co.	35,7	2,6	Iran	Staat
6	BP	34,0	2,5	UK	Privat
7	Royal Dutch Shell	31,9	2,4	Niederlande	Privat
8	Coal India	23,1	1,7	Indien	Privat
9	Pemex	22,6	1,7	Mexiko	Staat
10	Petroleis de Venezuela (PDVSA)	15,7	1,2	Venezuela	Staat
11	PetroChina/China Natl Petroleum	15,6	1,2	China	Staat
12	Peabody Energy	15,4	1,1	USA	Privat
13	ConocoPhillips	15,2	1,1	USA	Privat
14	Abu Dhabi	13,8	1,0	VAE	Staat
15	Kuweit Petroleum Corp.	13,5	1,0	Kuweit	Staat
16	Iraq National Oil Co.	12,6	0,9	Irak	Staat
17	Total SA	12,4	0,9	Frankreich	Privat
18	Sonatrach	12,3	0,9	Algerien	Staat
19	BHP Billiton	9,8	0,7	Australien	Privat
20	Petrobras	8,7	0,6	Brasilien	Staat
	Top 20	480,2	35,5		
	Global	1.354,4	100,0		

Tabelle 22 listet die 20 größten Produktionsunternehmen auf. Die Verbrennung ihrer Produkte produzierte bislang 480 Milliarden Kohlendioxid und Methan, das entspricht

⁵⁵ Carbon Majors (2019): Update of Top Twenty companies 1965–2017; Press Release 9 October 2019; Climate Accountability Institute.

Abbildung 130: Umweltkatastrophe Brand der Ölplattform »Deepwater Horizon« im Golf von Mexiko.



35 % der weltweiten Emissionen von fossilen Brennstoffen und Zement seit 1965 (insgesamt 1,35 Billionen Tonnen CO₂-Äquivalent). 12 % davon entstanden durch CO₂ beim Abfackeln, beim Entlüften der Beigase zur Erdölgewinnung und beim eigenen Brennstoffverbrauch bei der Produktion.

Der Name »BP« erinnert an die Explosion der Ölbohrinsel »Deepwater Horizon« im Golf von Mexiko 2010. Wegen mehrerer schwerer Fehler geriet die Ölplattform in Brand und explodierte. 87 Tage lang strömten insgesamt 800 Millionen Liter Öl ins Meer. Das war die schwerste Umweltkatastrophe dieser Art in der Geschichte der Menschheit.

Zahlreiche Tankerunfälle⁵⁶, Ölniselschäden, Bohrinselunglücke, undichte Bohrlöcher und leckende Pipelines verursachten große Ölkonzerne wie BP, Shell, Chevron, ExxonMobil, Total oder Texaco. Gelobte Besserung, mehr Sorgfalt und das Versprechen auf Nachhaltigkeit – leere Worthülsen. Greenwashing der multinationalen Ölkonzerne gaukelt der Öffentlichkeit Bemühen um die Umwelt vor und lenkt von deren dominanter Rolle bei der Erwärmung des Planeten ab. Im Dezember 2019 reichte ClientEarth eine Beschwerde gegen die Greenwashing-Kampagnen von BP ein. Im Juni 2020 bestätigte die englische NCP⁵⁷ die Berechtigung der Beschwerde. Vorbeugend zog im Februar 2020 BP ihre globalen Greenwashing-Werbekampagnen zurück.

Erneuerbare Energien wachsen schneller als jene aus fossilen Brennstoffen. Schon jetzt muss Energie aus Kohle subventioniert werden – erneuerbare Energie ist billig geworden. Für BP und alle anderen Erdölfirmer sollte jegliche Werbung für fossile Brennstoffe verboten werden. Es wäre im Gegenteil sinnvoll, Produkte der Erdölindustrie mit Gesundheitswarnungen und Hinweisen auf die Gefahren, die mit der

CO₂e-Äquivalent

ist die Klimawirksamkeit eines Gases im Vergleich zum CO₂ (dessen Bezugswert 1 ist).

⁵⁶ Wikipedia: https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_bedeutender_%C3%96lunf%C3%A4lle, abgerufen am 7.9.2020.

⁵⁷ <https://www.gov.uk/government/organisations/uk-national-contact-point>, abgerufen am 7.9.2020.

weiteren Verbrennung von fossilen Brennstoffen verbunden sind, vorzuschreiben. Wie weit reicht die Macht der Konzerne? Der verzögerte Ausstieg (2038) aus der Kohle in Deutschland, ungeahndete Umweltkatastrophen, die Erdöl- und Kohleindustrie verursachen, sind Zeugnisse ihrer Macht. Mit ein Grund ist eine Gesellschaft, die dem Mammon alles unterordnet – alles, was Gewinn verspricht, ist erlaubt und richtig. Ohne gesetzliche Regelungen und Verbote werden die fossilen Lagerstätten durch BP, Shell, ExxonMobil und andere Konzerne weiter ausgeschöpft und geleert werden, und sei es bis zum Untergang der Erde mit ihren Bewohnern.

Bislang beteiligen sich die Verwerter fossiler Brennstoffe nicht an einer Lösung der Klimakrise – weder finanziell noch rechtlich oder moralisch. Im Gegenteil, sie befeuern sie sogar.

Wie werden Klima, Umwelt und Natur geformt und beeinflusst? Bernhard Lichtberger erklärt die Entstehung der Erde, das Kommen und Gehen des Lebendigen – und das filigrane Wechselspiel zwischen Umwelt und Leben. Längst verändert die Menschheit ihre eigenen Lebensgrundlagen durch Verunreinigungen zu Land, zu Wasser und in der Luft. Wir sind auf dem Weg, die eigene Lebensgrundlage dauerhaft zu beschädigen – können wir den drohenden Katastrophen noch entkommen?

Der Autor zeigt auf, wie wir aus dieser Negativspirale ausbrechen können: Auf der Grundlage von Physik, Chemie und Biologie erläutert er anschaulich die grundlegenden Zusammenhänge zwischen der Temperatur der Luft, des Landes und des Meeres, den Klimatreibern und den Reaktionen des Erdsystems.

Er gibt so Einblicke in den natürlichen Energiehaushalt der Erde, erklärt die anthropogenen Einflüsse, das Verhalten und die Wirksamkeit von Treibhausgasen, die Bedeutung der Stoffflüsse von Stickstoff, Sauerstoff und Wasser. Phänomene wie Jetstreams, Golfstrom und El Niño werden in ihren Auswirkungen auf das globale Klima erklärt.

Bernhard Lichtberger studierte Physik in Linz. An der Technischen Universität Graz promovierte und habilitierte er sich. Er schrieb mehrere Fachbücher und veröffentlichte über 100 Fachartikel in Fachzeitschriften. In den letzten Jahren interessiert er sich zunehmend für den Klimawandel und widmet sich den Erkenntnissen der Klimaforschung.