



Ausarbeitung

Anthropogener Treibhauseffekt und Klimaänderungen

Darstellung des gegenwärtigen wissenschaftlichen Erkenntnisstandes

Anthropogener Treibhauseffekt und Klimaänderungen

Darstellung des gegenwärtigen wissenschaftlichen Erkenntnisstandes

Aktenzeichen: WD 8 - 3000 - 028/17
Abschluss der Arbeit: 27.09.17
Fachbereich: WD 8: Umwelt, Naturschutz, Reaktorsicherheit, Bildung und
Forschung

Die Wissenschaftlichen Dienste des Deutschen Bundestages unterstützen die Mitglieder des Deutschen Bundestages bei ihrer mandatsbezogenen Tätigkeit. Ihre Arbeiten geben nicht die Auffassung des Deutschen Bundestages, eines seiner Organe oder der Bundestagsverwaltung wieder. Vielmehr liegen sie in der fachlichen Verantwortung der Verfasserinnen und Verfasser sowie der Fachbereichsleitung. Arbeiten der Wissenschaftlichen Dienste geben nur den zum Zeitpunkt der Erstellung des Textes aktuellen Stand wieder und stellen eine individuelle Auftragsarbeit für einen Abgeordneten des Bundestages dar. Die Arbeiten können der Geheimschutzordnung des Bundestages unterliegende, geschützte oder andere nicht zur Veröffentlichung geeignete Informationen enthalten. Eine beabsichtigte Weitergabe oder Veröffentlichung ist vorab dem jeweiligen Fachbereich anzuzeigen und nur mit Angabe der Quelle zulässig. Der Fachbereich berät über die dabei zu berücksichtigenden Fragen.

Verzeichnis

1.	Einleitung: Berichte des IPCC als fachwissenschaftliche Grundlage	5
2.	Der IPCC als zusammentragendes Gremium jeweils aktuellster wissenschaftlicher Erkenntnisse	6
2.1.	Organisation des IPCC	6
2.2.	Berichterstellung	8
2.2.1.	Leitautorenteams	8
2.2.2.	Review-Prozess	10
2.2.3.	Verabschiedung	11
2.3.	IPCC-Berichtserstellung als Modell	12
2.4.	Reformen des IPCC-Verfahrens nach Empfehlungen des InterAcademy Council	13
3.	Stand der Wissenschaft zum anthropogenen Anteil an den beobachtbaren Klimaänderungen	15
3.1.	Zum Verständnis des Systems der Vertrauensgrade und Wahrscheinlichkeitsangaben in den IPCC-Berichten	15
3.2.	Stand der Wissenschaft	15
3.2.1.	Menschlicher Einfluss ist mit „95-100-prozentiger Sicherheit“ Hauptursache der Erwärmung	15
3.2.2.	Zunahme der Sicherheit des anthropogenen Einflusses auf die Erderwärmung im Laufe der IPCC-Sachstandsberichte	16
3.2.3.	Erklärung deutscher Klimawissenschaftler zum anthropogenen Klimawandel	17
4.	Bisher beobachtete Änderungen im Klimasystem laut Fünftem IPCC-Sachstandsbericht (einschließlich neuerer Entwicklungen)	18
4.1.	Klimaänderungen auf globaler Ebene	19
4.1.1.	Atmosphäre	19
4.1.1.1.	Temperaturanstieg gegenüber vorindustrieller Zeit um ca. 1°C, Änderungen bei Niederschlägen und Extremwetterereignissen	19
4.1.1.2.	Datensätze und Datenerhebung der globalen Mitteltemperatur	22
4.1.2.	Ozean	25
4.1.2.1.	Erwärmung um ca. 0,5°C in den letzten Jahrzehnten	25
4.1.2.2.	Messung der mittleren Ozeantemperatur	26
4.1.3.	Kryosphäre	27
4.1.3.1.	Zunehmende Masseverluste in Grönland und Antarktis, Ausdehnungsrückgang der Arktis, Gletscherschwund	27
4.1.4.	Meeresspiegel	30
4.1.4.1.	Anstieg seit Beginn des letzten Jahrhunderts um ca. 20 cm, Anstiegsrate derzeit bei 3,4 mm pro Jahr	30
4.1.4.2.	Datenerhebung zum Meeresspiegel	32
4.1.5.	Biogeochemische Kreisläufe	33

4.1.5.1.	Anstieg der CO ₂ -Konzentrationen um 40%, Versauerung der Ozeane	33
4.1.5.2.	Messung der CO ₂ -Konzentration	37
4.2.	Klimaänderungen in Deutschland	39
5.	Folgen des Klimawandels: Forschungserkenntnisse zu Klimaprojektionen, Großrisiken und Auswirkungen	41
5.1.	Künftige erwartete Klimaänderungen (Klimaprojektionen)	42
5.2.	Risiken des Klimawandels: schwere Klimafolgen	44
5.2.1.	„Burning embers“	44
5.2.2.	„Kippelemente“	46
5.3.	Beispiel: Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs	48
6.	Nachweise des Klimawandels als maßgeblich anthropogen verursachtem (laut Fünftem IPCC-Sachstandsbericht)	54
6.1.	Ursachenkomplexe für Klimaänderungen	54
6.2.	Eintrag anthropogener Treibhausgase	57
6.2.1.	Treibhausgas-Emissionsentwicklung	57
6.2.2.	Quellen der anthropogen eingetragenen Treibhausgase	60
6.3.	Änderung der Strahlungsbilanz: Treiber des gestiegenen Strahlungsantriebs	61
6.4.	Simulationsmodelle: Unerklärbarkeit der derzeitigen Erwärmung ohne anthropogene Faktoren	65
6.5.	Detailliertere Diskussion ausgewählter klimawirksamer Einflüsse	69
6.5.1.	Änderung der Sonnenaktivität	69
6.5.2.	Wasserdampf als Treibhausgas	71
6.5.3.	Vulkanischer CO ₂ -Ausstoß	72
6.5.4.	Wirkung von Aerosolen	73
6.5.5.	Rolle von Wärmeinseln	74
7.	Einordnung der Breite des Konsenses zum anthropogen verursachten Klimawandel in der klimawissenschaftlichen Literatur	75
7.1.	Nachweis über so genannte „Consensus“ Studien	76
7.2.	Wahrnehmung des Konsenses in der Öffentlichkeit	79
7.3.	Erklärungsansätze zur Diskrepanz der Wahrnehmung	81
8.	Fazit: Rollenverteilung von Wissenschaft und Politik	83
9.	Verwendete Literatur	85

1. Einleitung: Berichte des IPCC als fachwissenschaftliche Grundlage

Der „Zwischenstaatliche Ausschuss für Klimaänderungen“ (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) wurde 1988 von der Weltorganisation für Meteorologie (World Meteorological Organization, WMO) und dem Umweltprogramm der Vereinten Nationen (United Nations Environment Programme, UNEP) gegründet. Man reagierte damit auf den Umstand, dass Forscher¹ vermehrt seit Mitte des Jahrhunderts Anzeichen für beobachtbare Klimaänderungen feststellten und wollte den damit verbundenen komplexen Fragestellungen – hinsichtlich der Veränderungstiefe der Klimaänderungen und der möglichen Auswirkungen – Rechnung tragen. Mittels dieses wissenschaftlichen Gremiums sollten über die Vorstellung und Auswertung der weltweit erscheinenden Fachliteratur die jeweils neuesten Erkenntnisse aus der Klimaforschung und der Klimamodelle dokumentiert werden, ohne dass das Gremium dabei selbst forschend tätig sein sollte. Dieser jeweils neueste Kenntnisstand wird seither in den regelmäßigen Sachstandsberichten des IPCC zusammengetragen.

Seit der Gründung des IPCC, des so genannten Weltklimarats, sind **bisher fünf Sachstandsberichte** (1990, 1995, 2001, 2007, 2013/2014), so genannte Assessment Reports, erschienen. Der **aktuellste Sachstandsbericht ist damit von 2013/2014**. Der nächste soll 2020/2021 erscheinen; die Vorarbeiten dazu laufen bereits. Zusätzlich erscheinen in unregelmäßigen Abständen Sonderberichte² zu ausgewählten Themen und technische Abhandlungen. Die Sachstandsberichte bestehen jeweils aus Teilberichten der drei IPCC-Arbeitsgruppen: I (Wissenschaftliche Grundlagen), II (Auswirkungen, Anpassung und Verwundbarkeiten) und III (Verminderung des Klimawandels); hinzu kommt ein Synthesebericht, der die Informationen zum Klimawandel aus den drei Teilberichten zusammenträgt, die besonders für die Politik von Bedeutung sind.

In dem Gremium arbeiten an der **Erstellung der Sachstandsberichte jeweils viele hundert WissenschaftlerInnen** in Hauptarbeitsgruppen; als Nebenauctoren, Prüfeditoren (Reviewers) und Gutachter sind **insgesamt jeweils mehrere tausend Wissenschaftler** an einem Sachstandsbericht **beteiligt**.

Die Erstellung der Berichte findet unabhängig statt – Regierungen sind ‚nur‘ an der zweiten Runde der Begutachtungen und der Schlussabstimmung beteiligt. Als Arbeitsgrundlage für die Darstellung des jeweils aktuellen ‚Klimawissens‘ und seiner Einordnung dient den Arbeitsgruppen dabei das gesamte Spektrum weltweiter anerkannter Fachliteratur, insbesondere begutachtete und veröffentlichte Arbeiten – zur Berücksichtigung nicht peer-reviewter Arbeiten gelten strengere Vorgaben. Die Berichte durchlaufen in ihrer Erarbeitungsphase dabei ferner einen umfassenden und transparenten Begutachtungsprozess durch viele Fachleute aus allen Mitgliedsländern. Dabei wird immer der kleinste gemeinsame Nenner zu Aussagen bezüglich der Erkenntnisse und

1 In der gesamten Arbeit sind auch bei der überwiegend verwendeten männlichen Form jeweils beide Geschlechter einbezogen. Alle angegebenen Internetlinks geben den Stand 25.9.2017 wieder.

2 Bisher sind neun Sonderberichte erschienen. Derzeit werden Sonderberichte zu „1,5°C globaler Erwärmung“ (geplantes Erscheinen für Herbst 2018), zu „Ozeanen und Kryosphäre“ sowie „Land und Klimawandel“ (geplantes Erscheinen beider für Herbst 2019) erarbeitet. Siehe zu den Einzelheiten der Zeitpläne für die Sonderberichte: <http://www.de-ipcc.de/de/254.php>

Trendgeschehen gesucht. In den IPCC-Berichten sind alle Aussagen entsprechend gekennzeichnet und mit Wahrscheinlichkeiten versehen. Existieren vom allgemeinen Trend abweichende Resultate oder Meinungen, so wird die Wahrscheinlichkeit der Aussage gesenkt; Unsicherheiten und Bandbreiten werden benannt.

Auf Grund des Charakters der Teilberichte als **zusammengetragene Inhalte vorhandener wissenschaftlicher Erkenntnisse**, die auch ihre Weiterentwicklung jeweils mit berücksichtigen, und des besonderen Verfahrens der Berichtserstellung (s. dazu noch eingehender das folgende Kapitel) gelten sie daher als objektive Quelle zur Einschätzung des wissenschaftlichen Kenntnisstandes und die **klimawissenschaftliche Standardreferenz für Fachwissenschaft und Politik**.³

In der vorliegenden Arbeit werden Informationen des IPCC, deutscher Behörden, anerkannter Fachinstitute, -institutionen oder -zusammenschlüsse und ihnen angehörender Wissenschaftler sowie zugehöriger Websites sowie wissenschaftliche Fachartikel genutzt. Die Informationen werden einer, soweit in dem hier leistbaren Umfang, logischen Erschließung des Themas zugeordnet. Eine erschöpfende Darstellung des Themas des anthropogenen Klimawandels/ des anthropogenen Treibhauseffekts kann auf Grund der Komplexität und enormen Bandbreite des Themas an dieser Stelle nicht geleistet werden, wenngleich versucht wird, möglichen Zweifeln an einem anthropogenen Klimawandel mit dieser Zusammenstellung vorhandener wissenschaftlicher Erkenntnisse zu begegnen. So kann es ggf. noch aktuellere und nicht berücksichtigte Erkenntnisse oder Lücken zu einzelnen Aspekten in den nachfolgenden Kapiteln geben, ggf. sind einzelne Darstellungen aus Sicht der Fachwissenschaften unzureichend oder unterkomplex.

2. Der IPCC als zusammentragendes Gremium jeweils aktuellster wissenschaftlicher Erkenntnisse⁴

2.1. Organisation des IPCC

Der Auftrag des IPCC besteht darin, das naturwissenschaftliche, technische und sozioökonomische Wissen zu den beobachtbaren Klimaänderungen zusammenzutragen, mögliche Auswirkungen und Risiken des Klimawandels sowie Möglichkeiten zur Minderung des Klimawandels und Anpassungsmaßnahmen dazustellen. Wie schon erwähnt, forscht er dabei nicht selbst, sondern sichtet die Ergebnisse tausender WissenschaftlerInnen und bewertet sie nach den Kriterien der

3 Vgl. zu den vorangehenden Absätzen u.a. die Internetseiten des IPCC, der deutschen IPCC-Koordinierungsstelle und des Umweltbundesamtes: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimawandel/weltklimarat-ipcc>; www.ipcc.ch; <http://www.de-ipcc.de/de/119.php>

4 Die nachfolgenden Informationen zu den Kapitel 3.1 und 3.2 stammen von der IPCC-Internetseite, der Internetpräsenz der Deutschen IPCC-Koordinierungsstelle und persönlichen Nachfragen bei Dr. Christane Textor, der Koordinatorin der Deutschen IPCC-Koordinierungsstelle, sowie auch: IPCC-Koordinierungsstelle (o.J.). Der Weltklimarat IPCC. Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen. KompaktInfo. http://de-ipcc.de/media/de-ipcc-kompaktinfo_IPCC_web.pdf; sowie diverser IPCC-Factshetts (2013), u.a.: http://www.ipcc.ch/news_and_events/docs/factsheets/FS_what_ipcc.pdf; http://www.ipcc.ch/news_and_events/docs/factsheets/FS_select_authors.pdf; http://www.ipcc.ch/news_and_events/docs/factsheets/FS_ipcc_assess.pdf; http://www.ipcc.ch/news_and_events/docs/factsheets/FS_review_process.pdf; http://www.ipcc.ch/news_and_events/docs/factsheets/FS_ipcc_approve.pdf; http://www.ipcc.ch/organization/organization_procedures.shtml; http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/docs/WG1AR5_Questions.pdf

Belegbarkeit und Übereinstimmung der Erkenntnisse. Ein strenges Verfahren und detaillierte Verfahrensregeln sollen dabei sicherstellen, dass die Informationen des IPCC verlässlich, ausgewogen und umfassend sind. Die alle sechs bis sieben Jahre zu erstellenden Sachstandsberichte des IPCC sollen dabei politikrelevant, aber nicht politik-vorschreibend („not policy-prescriptive“) sein.

Da nach dem mehrfachen Revisionsprozess alle Mitgliedsländer des IPCC den Berichten zustimmen, haben sie (neben der extrem hohen wissenschaftlichen Reputation) international größtes Gewicht und bilden zudem auch die Basis für die Verhandlungen zur Klimarahmenkonvention.

Der IPCC ist als Organisation ein **wissenschaftliches Gremium** und gleichzeitig ein **zwischenstaatlicher Ausschuss**. Dem Ausschuss gehören an:

- die für jeden Bericht **neu** zusammengestellten WissenschaftlerInnenteams aus der ganzen Welt, die ehrenamtlich zur Arbeit des IPCC als Autoren und Gutachter beitragen,
- die Regierungen der Staaten, die Mitglieder der Vereinten Nationen oder der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) sind. (Dem letzten IPCC-Bericht stimmten somit 195 Länder zu.)
- Beobachter von knapp 30 VN-Organisationen (wie z.B. der Weltbank), 20 internationalen Organisationen (wie z.B. der OPEC) sowie über 80 Nichtregierungsorganisationen und Organisationen aus der Zivilgesellschaft (wie z.B. das International Aluminium Institute, der WWF oder die Yale University). (Die Vertreter dieser akkreditierten Organisationen können an den IPCC-Sitzungen und den Plenarsitzungen der Arbeitsgruppen teilnehmen und auch Kommentierungen im Begutachtungsverfahren vornehmen).⁵

Die Mitgliedstaaten des IPCC kommen etwa einmal jährlich zum **Plenum** zusammen. Daran nehmen hunderte Fachleute und VertreterInnen der Regierungen und der anerkannten Beobachterorganisationen teil. Das Plenum entscheidet über Managementangelegenheiten, Verfahren für die Berichterstellung und das Arbeitsprogramm. Außerdem wählt es die Vorsitzenden des IPCC und seiner Arbeitsgruppen (meist 2 pro Arbeitsgruppe) sowie die übrigen Vorstandsmitglieder (insgesamt gehören derzeit 34 Mitglieder dem Vorstand an). Fertige Berichte werden im Plenum verabschiedet und Themen für künftige beschlossen.

Ein **Exekutivkomitee** setzt die Beschlüsse des Plenums um. Dieses Komitee hat etwa ein Dutzend Mitglieder und setzt sich zusammen aus den Vorsitzenden und Vizevorsitzenden des IPCC sowie den Vorsitzenden der Arbeitsgruppen und von Projektgruppen. Die Leiter des IPCC-Sekretariats und der Geschäftsstellen stehen dem Exekutivkomitee beratend zur Seite.

Der IPCC hat derzeit drei **Arbeitsgruppen**: Die Arbeitsgruppe I zu den naturwissenschaftlichen Grundlagen des Klimawandels; Arbeitsgruppe II, die sich mit der Verwundbarkeit von sozioökonomischen und natürlichen Systemen gegenüber dem Klimawandel und dessen Auswirkungen

5 Vgl. zu ihren weiteren Rechten: http://www.ipcc.ch/organization/organization_procedures.shtml. Die Liste der Beobachter-Organisationen findet sich unter: <http://www.ipcc.ch/apps/contact/interface/organizationall.php>. Die Voraussetzungen für eine Akkreditierung (aktualisiert 2012) finden sich hier: <http://www.ipcc.ch/pdf/ipcc-principles/ipcc-principles-observer-org.pdf>

beschäftigt und Wege beschreibt, wie sich die Menschen an die globale Erwärmung anpassen können; und Arbeitsgruppe III, die politische und technologische Optionen zur Verminderung des anthropogenen Klimawandels aufzeigt. **Weitere Projektgruppen** beschäftigen sich zudem mit Szenarien und klimarelevanten Daten sowie Methoden für die Berichterstattung nationaler Treibhausgasemissionen. Gewählte Vorstände mit in der Regel je zwei Vorsitzenden leiten die Arbeits- und Projektgruppen jeweils für einen Berichtszyklus. In den Autorentteams übernehmen koordinierende Leitautoren die Verantwortung für einzelne Kapitel. Leitautoren sind für die Erstellung bestimmter Abschnitte verantwortlich. Weitere Autoren können hinzugezogen werden.

Die wissenschaftlichen Autoren und die Vorstände des IPCC arbeiten ehrenamtlich, ihnen werden nur Reisekosten erstattet. Die Geschäftsstellen der Arbeitsgruppen und die Datenzentren werden von den Ländern finanziert, die sie beherbergen. Der IPCC-Treuhandfonds finanziert zudem die Beteiligung von Fachleuten aus Entwicklungsländern an der IPCC-Arbeit und die Veröffentlichung und Übersetzung von IPCC-Berichten. Die Industriestaaten leisten freiwillige Beiträge zu diesem Fonds.

2.2. Berichterstellung

Zunächst beschließt das Plenum die Erstellung eines Berichts. Dann werden politische Entscheidungsträger und andere Nutzer von Klimawissen gebeten, wichtige Fragestellungen für den Bericht vorzuschlagen. Fachleute erstellen daraus eine vorläufige Gliederung, auf deren Basis das Plenum die Themenauswahl und Struktur des Berichts verabschiedet.

2.2.1. Leitautorenteams

Anschließend werden Leitautorenteams aus koordinierenden Leitautoren („Coordinating Lead Authors) und Leitautoren⁶ sowie Rezensenten („Review Editors“; „Reviewers“) für alle Kapitel zusammengestellt. Die Regierungen der Länder, die akkreditierten Beobachterorganisationen und weitere anerkannte FachwissenschaftlerInnen („other experts known through their publications and works“) schlagen dazu Kandidaten vor und reichen Listen ein, aus denen der Vorstand (unterstützt durch das „Task Force Bureau“⁷) das große Kernteam der IPCC-HauptautorInnen auswählt. Für den 5. Sachstandsbericht lagen mehr als 3000 Nominierungen vor.

Der Auswahl der Autoren folgt dabei den Zielen: wissenschaftliche Expertise, Gewährleistung eines unterschiedlichen Zugangs zum Thema, Beachtung der Repräsentation der Geschlechter

6 In deutschen Papieren werden Leitautoren oft auch als Hauptautoren bezeichnet.

7 Das TFB entspricht auch dem IPCC-Büro (“the term of the TFB is normally the same as the term of the IPCC Bureau”). Gegenwärtig besteht die TFB/das Büro aus über 30 Mitgliedern: dem Vorsitzenden und Co-Vorsitzenden des IPCC und seiner Arbeitsgruppen; zusätzlich kamen zur besseren Repräsentation zuletzt zwei afrikanische und ein asiatisches Mitglied hinzu. „Members of the Bureau are elected by the Panel for the duration of an assessment cycle following procedures laid down in Appendix C of the Principles Governing the IPCC Work.“ Dabei soll die Zusammensetzung des Büros “reflect a balanced geographic representation with due consideration for scientific and technical requirements. IPCC Bureau members are grouped according to the six regions of the World Meteorological Organization. None of them is paid by the IPCC.” S.: http://www.ipcc.ch/organization/organization_structure.shtml

und Weltregionen sowie ein Mix aus vorhandener Erfahrung der Arbeit im IPCC und einer Unerfahrenheit/Unvoreingenommenheit damit („with and without previous experience in IPCC“). Am letzten Bericht des IPCC arbeiteten schließlich mehr als 830 AutorInnen aus 80 Ländern in den Leitautorenteams mit⁸. Ca. 40 der Autoren waren in Deutschland tätig. Die Autoren unterliegen einer „conflict of interest policy“⁹.

Die **koordinierenden Leitautoren** koordinieren den Inhalt des Kapitels, für das sie zuständig sind. Es sind normalerweise zwei Leitautoren pro Kapitel, eine/r aus einem sogenannten Entwicklungsland, eine/r aus einem Industriestaat. Die Leitautoren arbeiten dabei **in Teams**, um den Inhalt eines Kapitels auf der Basis der besten verfügbaren wissenschaftlichen, technischen und sozio-ökonomischen Informationen („to produce the content of the chapter on the basis of the best scientific, technical and socio-economic information available“) zu erstellen. Berichtsabfassung

Für die Darstellung und Einordnung des vorhandenen ‚Klimawissens‘ nutzen die AutorInnen der drei Arbeitsgruppen prioritär alle vorhandenen Arbeiten aus wissenschaftlichen Fachzeitschriften, so genannte „Peer-Reviewed Papers“, die damit schon vor ihrer Veröffentlichung anonymisiert von wissenschaftlichen Experten unabhängig begutachtet und auch nach ihrer Veröffentlichung schon von der Fachwelt beurteilt wurden. Gewünscht ist zusätzlich, dass durchaus auch nicht begutachtete Veröffentlichungen herangezogen werden, z.B. in Form von Berichten von Behörden, der Industrie oder internationalen Organisationen. Diese müssen von den Leitautoren jedoch besonders sorgfältig auf Qualität und Validität hin geprüft werden; für so genannte ‚graue Literatur‘ (zu der z.B. auch Doktorarbeiten gehören können) ist eine Form des Peer-Review-Verfahrens vorzunehmen.

Zusätzlich werden in der Auswertung des jeweils gegenwärtigen wissenschaftlichen Fachstandes Nebenautoren von den Leitautoren herangezogen, die weiteres Material oder Informationen für die Abfassung liefern („enlist Contributing Authors. [...] to provide Lead Authors more technical information on specific subjects covered by the chapter“). Beim letzten Sachstandsbericht wurden über 1.000 Nebenautoren hinzugezogen.

Als Grundlage allein für den Bericht der Arbeitsgruppe I wurden mehr als zwei Millionen GB numerischer Datensätze von Klimamodellen und über 9.200 wissenschaftliche Publikationen herangezogen, die zitiert wurden. Dabei sind die Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis einzuhalten.¹⁰

8 Die komplette Liste der Leitautoren und Review Editors für alle Kapitel des 5. Sachstandsberichts ist einsehbar unter: http://www.ipcc.ch/pdf/ar5/ar5_authors_review_editors_updated.pdf

9 Vgl. zu den Vorgaben des IPCC zur Vermeidung von Interessenkonflikten: <http://www.ipcc.ch/pdf/ipcc-principles/ipcc-conflict-of-interest-2016.pdf>

10 Vgl. dazu z.B. die Empfehlungen zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis der Deutschen Forschungsgemeinschaft. DFG (2013 aktual.). Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis. Safeguarding Good Scientific Practice. Memorandum. Bonn: http://www.dfg.de/download/pdf/dfg_im_profil/reden_stellungnahmen/download/empfehlung_wiss_praxis_1310.pdf

Das Autorenteam muss sich bei allen Darstellungen und wissenschaftlichen Bewertungen des Sachstands stets einigen. Konträre Ansichten, Wissenslücken und Unsicherheiten müssen im Bericht klar dargestellt werden. Angewandt wird dabei das qualitative und quantitative Bewertungssystem anhand der vorhandenen Belege und Übereinstimmungen zu Aussagen und Erkenntnissen (s. dazu Kapitel 2.1). Durch die Wissenschaft nicht bestätigte Ansichten können sich auf diese Weise nicht durchsetzen.

Nach Vorlage einer ersten Fassung des Berichtsteils jeder der drei Arbeitsgruppen beginnt die jeweils mehrstufige Begutachtungsphase als essenzieller Bestandteil der Berichtserstellung.

2.2.2. Review-Prozess

Die **erste Begutachtung** der „First Order Drafts“ erfolgt durch wissenschaftliche Fachleute, die sich selbst als Gutachter für den jeweiligen Bericht im Vorfeld hatten registrieren lassen und die in ihrer Fachexpertise durch das IPCC anerkannt wurden („register through a process of self-declaration of expertise“ and „that have significant expertise and/or publications in particular areas of the report“); auch weitere Wissenschaftler, die von Beobachterorganisationen und von Regierungen nominiert wurden, nehmen auf Einladung des IPCC an der ersten Begutachtungsrunde teil.¹¹ Neben der **nachzuweisenden fachlichen Eignung** ist es Ziel der Gutachterausswahl, dass so viele Experten wie möglich in den Begutachtungsprozess involviert werden, die vorher nicht an der Berichtserstellung beteiligt waren, um eine **große Bandbreite an Sichtweisen und Expertisen** repräsentieren zu können. Die Arbeitsgruppe muss während des Reviewprozesses sicherstellen, dass den Gutachtern noch nicht international veröffentlichte Materialien und Arbeiten, die als Quellen im Berichtsentwurf genannt werden, zugänglich gemacht werden. Zwei Begutachtungsgutachter („Reviewers“) für jedes Kapitel stellen nach Eingang der Gutachten/Kommentierungen durch die Gutachter sicher, dass die Leit-/Hauptautoren der Teilberichte alle eingegangenen Kommentare angemessen beachten; ebenso wirken sie an der Klärung ggf. strittiger Fragen mit, um eine, wo nötig, Balance in der Darstellung zu erreichen. Dabei gilt, dass alle Kommentare von den Leitautoren schriftlich beantwortet werden müssen. Dabei können die Hinweise eingepflegt werden, Überarbeitungen stattfinden oder Zurückweisungen jeweils mit Begründung von Einwänden vorgenommen werden.

Ein überarbeiteter Entwurf sowie ein erster Entwurf für eine „Politische Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger“ („Second Order Drafts and a first draft of the Summary for Policymakers“) gehen dann in die **zweite Begutachtung**. Diese Textprüfung erfolgt nun zweifach: erneut durch die (sich z.T. selbst gemeldeten) registrierten Gutachter und parallel dazu durch die Regierungen der Mitgliedstaaten und deren RegierungsexpertInnen. In einer mehrmonatigen Frist müssen die Kommentierungen eingehen. Danach beaufsichtigen die Prüfeditoren erneut die angemessene Berücksichtigung der Kommentierungen. Auch hier müssen die Antworten der Leitautoren auf die Kommentare der Begutachter schriftlich erfolgen.

Der gesamte Review-Prozess ist sehr aufwändig, eine immense Zahl von Gutachtern ist beteiligt und eine immense Zahl von Anmerkungen muss bearbeitet werden. Für den 5. Sachstandsbericht

11 Weitere Details zu den Prinzipien und Prozessen der Begutachtung finden sich unter: http://www.ipcc.ch/organization/organization_procedures.shtml

beteiligten sich insgesamt ca. 2.000 Gutachter; pro Teilbericht jeder der drei Arbeitsgruppen gingen jeweils zehntausende **Kommentare** ein, insgesamt waren es **für den ganzen Bericht** über **140.000** (inklusive der ca. 6.000 Kommentierungen zum Synthesebericht).¹² Alle Kommentierungen und Antworten aus beiden Begutachtungsrunden werden nach Abschluss des gesamten Verfahrens zur Berichterstellung online zur Einsicht eingestellt – damit ist der **gesamte Prozess** für die Öffentlichkeit **transparent**.¹³

Übersicht zum Fünften Sachstandsbericht:

	AG I	AG II	AG III
HauptautorInnenteam	259 (209 Leitautoren, 50 Review Editoren) – ausgewählt aus über 1.000 Nominierungen aus 63 Ländern - + mehr als 600 Nebenauctoren aus 32 Ländern	310	235
Seiten	1.535	1.820	1.435
Kommentare	54.677 (von knapp 1.100 Gutachtern aus 55 Ländern und von 38 Regierungen: beteiligt waren an der ersten Begutachtung mehr als 600 Experten, an der zweiten mehr als 800 Experten und 26 Regierungen und in der Endrunde nochmals 32 Regierungen)	50.444 (von über 500 beteiligten Experten in der ersten Begutachtung und ca. 450 in der zweiten Begutachtung)	38.296 (von 600 Experten in der ersten Begutachtung und knapp 450 in der zweiten Begutachtung)
Zitierte Veröffentlichungen	9.200	>12.000	fast 10.000

Nach der weiteren Überarbeitung wird eine finale Fassung des Berichts und der „Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger“ (SPM) von den Autorentams erstellt, die den Regierungen der Mitgliedsländer vor der Plenarsitzung, in der die Abstimmung des Berichts und der SPM erfolgen soll, zugestellt wird.

2.2.3. Verabschiedung

Im Plenum selbst werden die unterschiedlichen Berichtsbestandteile bzw. IPCC-Materialien dann nach drei unterschiedlichen Verfahren („levels of endorsement“) abgestimmt.

¹² Die Kommentierungen für den Vierten Sachstandsbericht beliefen sich auf ca. 90.000; ca. 3.500 ExpertInnen waren an der Erstellung und Begutachtung des 4. Sachstandsberichts beteiligt („450 Lead Authors, 800 Contributing Authors, and 2,500 Expert Reviewers“).

¹³ Eingesehen werden kann die Begutachtung tabellarisch aufbereitet mit allen Kommentierungen der Gutachter und Entgegnungen des Autorentams unter: <http://www.climatechange2013.org/report/drafts-and-review-materials/>

Es gibt erstens das **Zustimmungs-Verfahren („approval“)**, was bedeutet, dass Zeile für Zeile zunächst einer Diskussion, gegebenenfalls einer Verhandlung und schließlich der Zustimmung unterworfen wird. Das gilt für die ca. 30-seitigen „Zusammenfassungen für politische Entscheidungsträger“, die bei einer mehrtägigen Plenarsitzung von den Regierungen der Mitgliedsländer pro Zeile verhandelt und verabschiedet werden. Die Zusammenfassungen enthalten dabei nur Informationen, die auch in den zugrundeliegenden Berichten genutzt werden. Die Autoren der Berichte entscheiden, ob die von den Regierungen vorgeschlagenen Formulierungen bei Änderungen inhaltlich korrekt sind.

Das zweite Verfahren ist das der **Annahme („adoption“)**, wobei Abschnitt für Abschnitt bestätigt wird. Es wird z.B. bei den Syntheseberichten angewandt.

Schließlich gibt es als drittes Verfahren das der **Akzeptanz („acceptance“)**, bei dem allgemein bestätigt wird, dass es sich um einen verständlichen, objektiven und ausgewogenen Blick auf das Thema handelt. Die kompletten (zuvor den mehrstufigen Begutachtungsprozessen schon unterzogenen) Teilberichte der Arbeitsgruppen fallen in diese Kategorie.¹⁴

2.3. IPCC-Berichtserstellung als Modell

Dieses durch den IPCC erprobte Berichtserarbeitungsmodell gilt insgesamt als so erfolgreich, dass nach Vorbild des IPCC 2012 die „Intergovernmental science-policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services“ (IPBES) gegründet wurde.

Die Reputation und Anerkennung der IPCC-Berichte innerhalb der Klimawissenschaften, aber auch in der Politik ergibt sich daraus, dass es in den gesamten Geowissenschaften kein vergleichbar angewandtes Verfahren (in der gesamten Beteiligung von vielen tausend Wissenschaftlern) und keine vergleichbaren Inhalte (wie die Heranziehung von tausenden schon in der Fachwelt veröffentlichten Quellen) gibt, die überdies nochmals so sorgfältig und intensiv begutachtet werden wie die IPCC-Berichte. Es ist nur plausibel, davon auszugehen, dass in einem solchen Prozess der Beteiligung einiger tausend Wissenschaftler aus den unterschiedlichsten Regionen der Welt ein grundsätzlicher Zweifel an einem anthropogenen Klimawandel (oder dem anthropogen verursachtem Treibhauseffekt als Hauptursache für die Erwärmung) nicht unterdrückt werden könnte.

Die Tatsache, dass die Zusammenfassungen der Berichte anschließend noch von den Regierungen ‚der Welt‘ mit ihren jeweils sehr unterschiedlichen Interessenslagen¹⁵ gemeinsam verabschiedet werden, ist nur deshalb möglich, weil die Zusammenstellung der wissenschaftlichen Ergebnisse durch das IPCC als konsistent bewertet wird.

14 Vgl. zu den unterschiedlichen Abstimmungsmodi: IPCC (last updated 2013). Appendix A to the Principles Governing IPCC Work. Procedures for the preparation, review, acceptance, adoption, approval and publication of IPCC Reports: <http://www.ipcc.ch/pdf/ipcc-principles/ipcc-principles-appendix-a-final.pdf>

15 Berichtet wurde zum Beispiel eher von Streichungen, die Länder wie die USA, China oder Saudi-Arabien bei den „Zusammenfassungen für politische Entscheidungsträger“ noch erreichten, als dass Verschärfungen eingebracht worden wären.

Zuletzt lief aktuell das Verfahren zur Selbstmeldung als Gutachter für die erste Begutachtungsrunde des Sonderberichts „1,5°C-globale Erwärmung“. Vom 31.7. bis 17.9.2017 konnten sich interessierte ExpertInnen dafür online registrieren lassen, um gegebenenfalls anschließend ausgewählt zu werden¹⁶, weitere Meldungsverfahren werden im kommenden Jahr folgen.

2.4. Reformen des IPCC-Verfahrens nach Empfehlungen des InterAcademy Council

2010 haben der VN-Generalsekretär und der damalige IPCC-Vorsitzende Rajendra K. Pachauri den InterAcademy Council (IAC), das internationales Netzwerk von Wissenschaftsakademien, aufgefordert, den IPCC als Gremium zu überprüfen, Schwachstellen in den Prozessen zu benennen und Vorschläge auszuarbeiten, wie die Verfahren zur Berichtserstellung noch gefestigt werden könnten. Dies war eine Reaktion auf einige Fehler, die sich im 4. Sachstandsbericht gefunden hatten¹⁷ – die aber keine der Hauptaussagen betrafen.

Insgesamt bewertete die von dem IAC einberufene Kommission in ihrem daraufhin veröffentlichten Bericht die Aufarbeitung des wissenschaftlichen Sachstandes durch den IPCC als erfolgreich. Die Hauptempfehlungen der Kommission betrafen vor allem die Führung und das Management, den Review-Prozess, die Vereinheitlichung bei der Beschreibung von Unsicherheiten sowie die Kommunikation und die Transparenz im Assessment-Prozess.¹⁸ In einem umfassenden Reformprozess von 2010-2012 sind die Empfehlungen weitgehend umgesetzt worden, um zusätzliche Transparenz zu schaffen und das Vertrauen in den Prozess und die Berichte noch weiter zu stärken.

So gibt es seither den vom Plenum zu wählenden Exekutivausschuss, dem auch Nicht-Klimawissenschaftler, so genannte unabhängige Mitglieder angehören. So soll der IPCC in die Lage versetzt sein, auch zwischen den Plenarsitzungen, die in der Regel nur jährlich sind, wichtige Entscheidungen zu treffen: z.B. zu Korrekturen in veröffentlichten Berichten oder zu Anpassungen

16 Die Registrierung für “The Expert Review of the First Order Draft of the IPCC Special Report Global Warming of 1.5 °C” konnte erfolgen unter; <https://www.ipcc.ch/apps/comments/sr15/fod/register.php>

17 Gegenüber dem IPCC wurde über die Jahre hinweg unterschiedliche Kritik geäußert: grundsätzliche und allgemeiner Art - in der Mehrheit vor allem von so genannten Klima(wandel)skeptikern. Eine intensivere Debatte über den IPCC, seine Überparteilichkeit und Genauigkeit fand in einer breiteren Öffentlichkeit vor allem nach der Veröffentlichung des Vierten Sachstandsberichts im Jahr 2007 in den Jahren 2009/2010 statt. Ausgangspunkt war dort vor allem eine falsche Jahreszahl zum Abschmelzen der Himalaya-Gletscher (2035 statt richtig 2350) und eine falsche (von der niederländischen Regierung) gelieferte Zahl zu Überflutungsgebieten in Holland sowie andere, wohl minimale Ungenauigkeiten, schließlich das Auftreten des IPCC-Vorsitzenden, das teilweise kritisiert wurde.

Auch aktuell sieht sich der IPCC durchaus Kritik ausgesetzt – erneut eher von klimaskeptischer Seite, wobei ihm zum Beispiel fehlende wissenschaftliche Unabhängigkeit auf Grund der Nichtbeachtung kritischer Stimmen und Einwände zum anthropogenen Klimawandel (s. zur Vermeintlichkeit Kapitel 7) oder auch „moralische Erpressung der Politik“ vorgeworfen wird. Vgl. zu letzterem Einwand z.B.. Berliner Kreis e.V. (2017). Klima- und energiepolitische Positionen. Papier vom 30.5.2017: <http://berliner-kreis.info/wp-content/uploads/2017/05/2017-05-30-Klima-und-energiepolitische-Forderungen-1.pdf>;

18 Vgl. zu den nachfolgenden Ausführungen InterAcademy Council (2010). Review of the IPCC: <http://review-ipcc.interacademycouncil.net/> als auch: <http://reviewipcc.interacademycouncil.net/ReportNewsReleaseGerman.html>; sowie: http://www.ipcc.ch/organization/organization_review.shtml

bei der Erarbeitung der Sachstandsberichte. Auch ein Geschäftsführer mit dem Status eines leitenden Wissenschaftlers wird seither ernannt. Er leitet das Sekretariat, koordiniert die täglichen Betriebsabläufe und spricht im Namen der Organisation und hat damit größere Unabhängigkeit oder Verantwortung gegenüber der vorherigen Position des Sekretariatsleiters.

Auch ein „IPCC Error Protocol“ („new Annex 3 of Appendix A“) wurde 2011 eingerichtet, womit Hinweise auf vermutete, mögliche Fehler in den Berichten direkt per E-Mail an den IPCC gesendet werden können.¹⁹

Um vielfältige Perspektiven und neue Ansätze für jeden Sachstandsbericht sicherzustellen, ist seither auch die Dienstzeit sowohl des IPCC-Vorsitzenden, der Vizevorsitzenden und des vorgeschlagenen Geschäftsführers als auch der (Co-)Vorsitzenden der Arbeitsgruppen, in der Regel für die Dauer eines Berichtszyklus, begrenzt. Nur in individuellen Einzelfällen kann in der Entscheidung des Plenums davon abgewichen werden. Eine klare Interessenskonflikt-Richtlinie für hochrangige Führungspositionen, alle Autoren, Reviewers und Personalverantwortliche wird seither angewandt.

Auch wenn die Kommission den Begutachtungs-Prozess als gründlich erachtete, wurde eine stärkere Durchsetzung der bestehenden IPCC-Review-Verfahren angemahnt. Review Editors werden seither (neben der auch schon zuvor bestehenden Verpflichtung dazu) nochmals klar aufgefordert, ihre Autorität zu verwenden, um immer zu gewährleisten, dass alle Begutachtungs-Kommentare adäquat berücksichtigt werden - dazu wird seither auch eine schriftliche Zusammenstellung der wichtigsten Fragen und Anmerkungen erstellt - und Meinungsverschiedenheiten sowie alternative Ansichten ausreichend in den Berichtsentwürfen wiedergegeben werden.

Bei der Verwendung so genannter grauer Literatur wurden die Richtlinien spezifiziert („Annex 2 of Appendix A“) – einschließlich der Hinzufügung von Richtlinien über inakzeptable Literaturtypen – und eine klare Kennzeichnungspflicht für unveröffentlichte Literatur eingeführt.

Eine neue Kommunikationsstrategie wurde vom IPCC entwickelt. Seither werden aus den Originalberichten mehr abgeleitete Produkte (wie z.B. auch kleinere Zusammenfassungen in weiteren Sprachen oder „Frequently Asked Questions“) erstellt, damit für die politisch und fachlich interessierte Öffentlichkeit ein verbesserter Zugang zu Informationen des IPCC besteht. Klare Regeln wurden getroffen, wer im Namen des IPCC sprechen kann und wie dies im Rahmen der IPCC-Berichte und Mandate geschehen soll. Eine größere Transparenz hinsichtlich der Prozesse zur Berichtserstellung und zur Auswahl der Teilnehmer wird auch online umgesetzt.

19 Die Adresse lautet: ipccerrorprotocol@wmo.int; dabei sollen die folgenden Informationen beigebracht werden: http://www.ipcc.ch/organization/organization_procedures.shtml#tabs-1

3. **Stand der Wissenschaft zum anthropogenen Anteil an den beobachtbaren Klimaänderungen**

3.1. Zum Verständnis des Systems der Vertrauensgrade und Wahrscheinlichkeitsangaben in den IPCC-Berichten

Dem Umstand, dass wissenschaftliche Erkenntnisse vielfältig oder mit Unsicherheiten behaftet sein können, begegnet der IPCC mit einer entsprechenden Einstufung seiner zusammenfassenden und auswertenden Aussagen. Autoren aller drei Arbeitsgruppen benutzen dafür ein kalibriertes System zur Angabe der jeweiligen Belastbarkeit von Aussagen mit klar zugeordneten Begrifflichkeiten.

So wird die Belastbarkeit einer Aussage als **qualitativer Vertrauensgrad** in fünf Stufen (**von sehr gering bis sehr hoch**) ausgedrückt. Dabei beruhen die Aussagen auf einer Bewertung der zugrunde liegenden Belege und ihrer Übereinstimmung. In vielen Fällen ist durch die Synthese von Belegen und Übereinstimmung die Zuordnung eines Vertrauensgrads möglich, insbesondere für Aussagen mit höherer Übereinstimmung und mehreren unabhängigen Belegketten. Der Gewissheitsgrad in jeder Hauptaussage beruht auf **Art, Menge, Qualität und Stimmigkeit der Belege** sowie dem **Grad der Übereinstimmung** (auch in Stufen zugeordnet). Die zusammenfassenden Begriffe für Belege lauten: begrenzt, mittelstark bzw. belastbar. Für die Übereinstimmung sind sie gering, mittel bzw. hoch.

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein bestimmtes Ergebnis bereits aufgetreten ist oder in Zukunft auftreten wird, kann **quantitativ**, wie häufig im Teilbericht der Arbeitsgruppe 1 und in der „Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger“ geschehen, mit folgenden Begriffen beschrieben werden:

- „praktisch sicher“ = 99–100%,
- „sehr wahrscheinlich“ = 90–100%,
- „wahrscheinlich“ = 66–100%,
- „ungefähr so wahrscheinlich wie nicht“ = 33-66%,
- „unwahrscheinlich“ = 0-33% und
- „sehr unwahrscheinlich“ 0–10%.

Als zusätzliche Termini werden, wenn möglich, folgende verwandt:

- „äußerst wahrscheinlich“ („extremely likely“) = 95–100%,
- „eher wahrscheinlich als nicht“ = >50–100%,
- „eher unwahrscheinlich als nicht“ = 0–<50%.

3.2. Stand der Wissenschaft

3.2.1. Menschlicher Einfluss ist mit „95-100-prozentiger Sicherheit“ Hauptursache der Erwärmung

Im dem aktuellsten, **dem Fünften Sachstandsbericht** des IPCC von 2013/2014 wird in Folge der vorangehenden Sachstandsberichte bestätigt, dass die Wissenschaft den anthropogenen Einfluss

auf das Klimasystem und auf viele seiner in den letzten Jahrzehnten beobachtbaren Veränderungen als erwiesen sieht. Dies sei offensichtlich auf Grund der ansteigenden Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre, dem positiven „Strahlungsantrieb“ (Näheres dazu im Kapitel 6.3) der beobachteten Erwärmung und des Verständnisses des Klimasystems. Mit nunmehr **95-100-prozentiger Sicherheit (= äußerster Wahrscheinlichkeit)** könne der **menschliche Einfluss als Hauptursache** der beobachteten Erwärmung seit Mitte des 20. Jahrhunderts ausgemacht werden; **mehr als die Hälfte des mittleren globalen Temperaturanstiegs sei auf menschliche Aktivitäten** (vor allem die Freisetzung von Treibhausgasen – insbesondere CO₂- und anderer anthropogener Treiber) **zurückzuführen**. Wörtlich heißt es im Fünften Sachstandsbericht:

- "Human influence on the climate system is clear. This is evident from the increasing greenhouse gas concentrations in the atmosphere, positive radiative forcing, observed warming, and understanding of the climate system."
- "Human influence has been detected in warming of the atmosphere and the ocean, in changes in the global water cycle, in reductions in snow and ice, in global mean sea level rise, and in changes in some climate extremes. This evidence for human influence has grown since AR4 [Vierter Sachstandsbericht]. It is extremely likely (95-100% probability, based on scientific evidence and expert judgement) that human influence has been the dominant cause of the observed warming since the mid-20th century." "...that human activities caused more than half of the observed increase in global average surface temperature from 1951 to 2010."
- "It is extremely likely that more than half of the observed increase in global average surface temperature from 1951 to 2010 was caused by the anthropogenic increase in GHG concentrations and other anthropogenic forcings together."²⁰

3.2.2. Zunahme der Sicherheit des anthropogenen Einflusses auf die Erderwärmung im Laufe der IPCC-Sachstandsberichte

Der Gewissheitsgrad zum anthropogenen Einfluss auf die beobachtete Erwärmung/die Klimaänderungen ist im Zeitverlauf klar gewachsen. Die IPCC-Sachstandsberichte haben in ihren Zusammenfassungen des jeweiligen aktuellen wissenschaftlichen Standes seit Beginn der zweitausender Jahre eine eindeutige Zunahme der Sicherheit der Forschung ausgemacht: von „wahrscheinlich“ über „sehr wahrscheinlich“ zu „äußerst wahrscheinlich“ 2013.

2001 stellte der **Dritte Sachstandsbericht** zum damals aktuellen Kenntnisstand noch fest, dass unter der Berücksichtigung der verbleibenden Unsicherheiten (jedoch bei einer Unwahrscheinlichkeit der Erwärmung vollständig natürlichen Ursprungs) der **Großteil der beobachteten Erwärmung** im Verlaufe der letzten 50 Jahre **wahrscheinlich auf menschliche Aktivitäten** (und die durch sie verursachten steigenden Treibhausgaskonzentrationen) zurückzuführen sei:

20 Alle Zitate stammen aus: IPCC (2013). Summary for Policymakers. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge, New York. S. für Nachweise auch unter: http://ar5-syr.ipcc.ch/topic_observedchanges.php (S. 1), <http://www.un.org/apps/news/printnewsAr.asp?nid=47047>, http://ar5-syr.ipcc.ch/topic_observedchanges.php#section_1_2 (Punkt 1.3.1); https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_TS_FINAL.pdf (S. 60).

- "There is new and stronger evidence that most of the warming observed over the last 50 years is attributable to human activities."
- "The observed warming over the 20th century is unlikely to be entirely natural in origin."
- "An increasing body of observations gives a collective picture of a warming world and modeling studies indicate that most of the observed warming at the Earth's surface over the last 50 years is likely (greater than 66% probability, based on scientific evidence and expert judgement) to have been due to human activities."²¹

2007 fasst der **Vierte Sachstandsbericht** den Kenntnisstand der Wissenschaft **2007** dann so zusammen, dass der Einfluss des Menschen auf das Klimasystem als eindeutig gewertet werden konnte; die Beobachtungen und Einordnungen zum Anstiegs der globalen mittleren bodennahen Luft- und Oberflächenwassertemperatur, dem Schmelzen von Schnee und Eis und dem Anstieg des durchschnittlichen globalen Meeresspiegels seien diesbezüglich klar. Es sei **sehr wahrscheinlich (mit mehr als 90%)**, dass der **Großteil der beobachteten Erwärmung** seit Mitte des letzten Jahrhunderts auf den beobachtbaren Anstieg an anthropogenen Treibhausgasen zurückgeführt werden könne:

- "Warming of the climate system is unequivocal, as is now evident from observations of increases in global average air and ocean temperatures, widespread melting of snow and ice and rising global average sea level".
- "Most of the observed increase in global average temperatures since the mid-20th century is very likely" [greater than 90% probability based on scientific evidence and expert judgement] due to the observed increase in anthropogenic GHG concentrations."²²

3.2.3. Erklärung deutscher Klimawissenschaftler zum anthropogenen Klimawandel

Auch aktuell bekräftigen z.B. deutsche Wissenschaftler diese Erkenntnisse der Klimawissenschaften. Im Vorfeld des G20-Gipfels in Hamburg im Juli 2017 haben die führenden deutschen Forschungsinstitute in den Klimawissenschaften – maßgeblich vertreten durch das Deutsche Klima-Konsortium – eine Erklärung²³ veröffentlicht, in der sie den Stand der Wissenschaft zur Frage eines anthropogenen Klimawandels knapp zusammenfassen.

In der Erklärung heißt es zum Umstand eines anthropogenen Klimawandels:

-
- 21 IPCC (2001). Climate Change 2001. Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Watson, R.T. and the Core Writing Team (eds.)]. Cambridge, New York (398f).
 - 22 IPCC (2007). Climate Change 2007. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. Geneva (104 ff).
 - 23 Die Erklärung wurde veröffentlicht durch: das Deutsche Klimakonsortium (DKK); der Deutscher Wetterdienst (DWD); die Deutsche Meteorologische Gesellschaft (DMG); die Behörde für Umwelt und Energie der Freien und Hansestadt Hamburg; das Institut für Wetter- und Klimakommunikation (IWK); Klimafakten.de; Munich Re und die Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle am DLR (Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt).

- „1. Der **Klimawandel** ist eine **Tatsache** und der **Mensch die Hauptursache**. Ohne die menschliche Aktivität, insbesondere die Verbrennung von Kohle, Öl und Gas, lassen sich die beobachteten Veränderungen im Klimasystem nicht erklären.
- 2. Der natürliche Wechsel von Kalt- und Warmzeiten erfolgt über Jahrzehntausende. Die **derzeit** beobachtete, im Vergleich dazu **schnelle Erwärmung** in nur etwa 150 Jahren mit ihren vielfältigen Folgen ist eine **völlig neue Entwicklung**. Der Vergleich mit früheren Warmzeiten ist unzulässig.
- 3. Fortgesetzte Emissionen von Treibhausgasen werden eine weitere Erwärmung und langanhaltende Änderungen aller Komponenten des Klimasystems verursachen und damit die Wahrscheinlichkeit von schwerwiegenden weitverbreiteten und irreversiblen Folgen für Menschen und Ökosysteme erhöhen.“²⁴

Die Forschungsinstitute verstehen sich in ihrer Erklärung dabei ausdrücklich als Verteidiger einer unabhängigen Wissenschaft, der sie sich verpflichtet fühlen. In den Inhalten bezieht man sich auf den Fünften Sachstandsbericht und würdigt den IPCC als das klimawissenschaftlich relevante Gremium und anerkennt die Arbeitsleistung, die viele tausend WissenschaftlerInnen dort ehrenamtlich zur wissenschaftlichen Auswertung des vorhandenen Kenntnisstandes einbringen.

Dem 2009 gegründeten **Deutschen Klima-Konsortium** gehören die bedeutenden deutschen klimawissenschaftlich forschenden Institute an: GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel; Deutscher Wetterdienst; Institut für Weltwirtschaft; Max-Planck-Institut für Meteorologie; Institut für Umweltp Physik - Zentrum für Marine Umweltwissenschaften IUP-MARUM, Universität Bremen; Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI); Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit (CEN); Centrum für Globalisierung und Governance (CGG); Deutsches Klimarechenzentrum GmbH (DKRZ); Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Institut für Physik der Atmosphäre; Forschungszentrum Jülich GmbH; Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ); Helmholtz-Zentrum Geesthacht - Zentrum für Material- und Küstenforschung GmbH; Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Meteorologie und Klimaforschung (IMK); Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK); Leibniz-Institut für Troposphärenforschung e. V. (TROPOS); Max-Planck-Institut für Chemie; Exzellenzcluster "Ozean der Zukunft" an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel; Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ); Universität Hohenheim (UHOH); Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW).

4. **Bisher beobachtete Änderungen im Klimasystem laut Fünftem IPCC-Sachstandsbericht (einschließlich neuerer Entwicklungen)**

Die Aussagen zu einem anthropogenen Klimawandel werden an Hand einer **Vielzahl und Breite der Belege zu den beobachtbaren Klimaänderungen, die im Zusammenhang mit dem anthropogenen Treibhauseffekt stehen**, getroffen: so haben sich nicht nur die Atmosphäre und der Ozean im globalen Mittel erwärmt, auch die Schnee- und Eisbedeckung der Nordhalbkugel gehen zurück, die Gebirgsgletscher schmelzen, der Meeresspiegel steigt, einige Extremwetterereignisse

24 G20 Climate (Verbund deutscher KlimawissenschaftlerInnen) (2017). Klimafakten als Grundlage für politische Entscheidungen. Presseinformation zum Stand der Forschung vom 6. Juli 2017: http://www.deutsches-klima-konsortium.de/fileadmin/user_upload/pdfs/Veranstaltungen/Climate20/DE/Climate20_Presseinformation.pdf

nehmen zu, die Konzentrationen der Treibhausgase sind stark angestiegen und der Ozean versauert.

In dem gut 1.500 Seiten umfassenden Teilbericht der Arbeitsgruppe I („Naturwissenschaftliche Grundlagen“) des **IPCC aus dem Jahr 2013** werden die Belege ausführlich behandelt und dargestellt. Im Folgenden werden daraus Teilergebnisse für die globale Entwicklung dargestellt und direkte Verweise als Seitenzahlen des referierten IPCC-Berichts in Klammern gesetzt. Neure Entwicklungen der letzten Jahre werden ergänzend angeführt. Eine gesonderte Darstellung folgt am Ende des Gesamtkapitels zu den beobachteten Klimaänderungen in Deutschland.

4.1. Klimaänderungen auf globaler Ebene

Die Beschreibung der markantesten der bisher festgestellten Klimaänderungen erfolgt verkürzt als Überblick²⁵ und wird jeweils um neuere Erkenntnisse und Entwicklungen ergänzt. Wenn möglich, werden auch die jeweiligen Verfahren zur Datenerhebung dargestellt.

4.1.1. Atmosphäre

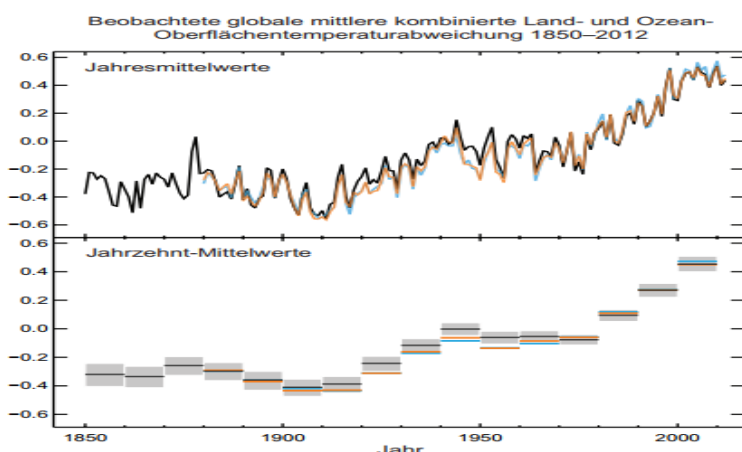
4.1.1.1. Temperaturanstieg gegenüber vorindustrieller Zeit um ca. 1°C, Änderungen bei Niederschlägen und Extremwetterereignissen

Die **globale Mitteltemperatur**²⁶ in Bodennähe **stieg im Zeitraum von 1880 bis 2012 um 0,85 °C**²⁷. Jedes der drei vergangenen Jahrzehnte war an der Erdoberfläche wärmer als alle vorhergehenden seit 1850 (s. Abbildung). (3) Etwa zwei Drittel der gesamten beobachteten Erwärmung entfallen auf den Zeitraum seit Mitte der 1970er Jahre²⁸.

-
- 25 Grundlage für die nachfolgende Zusammenstellung des Kapitels zu den Klimaänderungen auf globaler Ebene ist: **IPCC (2014). Klimaänderung 2013. Zusammenfassung des Teilberichts der Arbeitsgruppe I. Naturwissenschaftliche Grundlagen**. Deutsche Übersetzung der deutschen IPCC-Koordinierungsstelle, der Akademie der Naturwissenschaften der Schweiz und des Österreichischen Bundesumweltamtes. Bern, Bonn, Wien: <https://www.ipcc.ch/pdf/reports-nonUN-translations/deutsch/ar5-wg1-spm.pdf>, Im Folgenden werden konkrete **Verweise auf diese Zusammenfassung mit Seitenzahlen in Klammern** angegeben. Weitere zusätzliche Quellen zur Darstellung neuerer Entwicklungen als auch zu den Kapiteln der Datenerfassungen werden gesondert aufgeführt.
- 26 Die globale Mitteltemperatur/globale Durchschnittstemperatur wird vollständig auch als globale mittlere Oberflächentemperatur bezeichnet und ist eine Kombination aus global gemittelten Lufttemperaturdaten der Land- und Ozeanoberflächen. Dabei ist der Durchschnittswert der Temperatur ein flächengewichtetes (wie bei einem über die Erdoberfläche gelegten Gitternetz) arithmetisches Mittel.
- 27 Angegeben nach Fünftem IPCC-Sachstandsbericht; dies ist ein Durchschnittswert aus den drei am längsten zur Verfügung stehenden Zeitreihen (der drei bedeutenden Zeitreihenmessungen von NOAA, NASA und Hadley), die dabei 2012 Werte von 0,65°C bis 1,06°C ausweisen. Vgl. zur Erklärung und Einordnung (auch der Messreihen) das kommende Unterkapitel zur Datenerfassung. Die verwendeten Abkürzungen der Messinstitutionen werden in den Fußnoten auf der kommenden Seite aufgelöst.
- 28 Eine weitere Erwärmungsphase war zwischen 1910 und 1945 zu beobachten, in der aufgrund der noch vergleichsweise geringen Konzentration von Treibhausgasen auch natürliche Schwankungen einen deutlichen Einfluss hatten. S. dazu auch Kapitel 6.

Die Entwicklung der **Niederschläge** erfolgte regional in unterschiedlicher Weise. Mit „hohem Vertrauen“ **stiegen** sie über die Landflächen gemittelt in den **mittleren Breiten der Nordhemisphäre und** in den **feuchten** Regionen der **Tropen** („mittleres Vertrauen“ besteht bei ihrer Zunahme seit 1901). (3) In trockenen Regionen der Subtropen nahmen sie ab.

Seit 1950 werden **bei vielen extremen Wetterereignissen Veränderungen beobachtet**: „sehr wahrscheinlich“ hat weltweit die Zahl der kalten Tage und Nächte abgenommen und die der warmen Tage und Nächte zugenommen; „wahrscheinlich“ ist die **Häufigkeit der Hitzewellen** in weiten Teilen **Europas, Asiens und Australiens angestiegen**. „Wahrscheinlich“ gibt es mehr Landregionen, in denen die Zahl der Starkniederschlagsereignisse zugenommen, als solche, wo diese abgenommen hat. Dabei sind die **Starkniederschlagsereignisse in Nordamerika und Europa** „wahrscheinlich“ **häufiger und intensiver** geworden. (3) Auch extreme Küstenhochwasser haben „sehr wahrscheinlich“ zugenommen. Bei Änderungen von Dürren, Fluten und kleinräumigen Wetterphänomenen ist das „Vertrauen geringer“.²⁹



Der IPCC gibt die beobachtete Temperaturabweichung in °C auf der x-Achse von 1850 bis 2012 auf der Y-Achse (der drei gemittelten Datensätze) relativ zum Zeitraum (Referenzperiode) 1961-1990 an – der beschriebene Temperaturanstieg im Text bezieht sich auf den Zeitpunkt 1880; IPCC (2014) AG I: 4

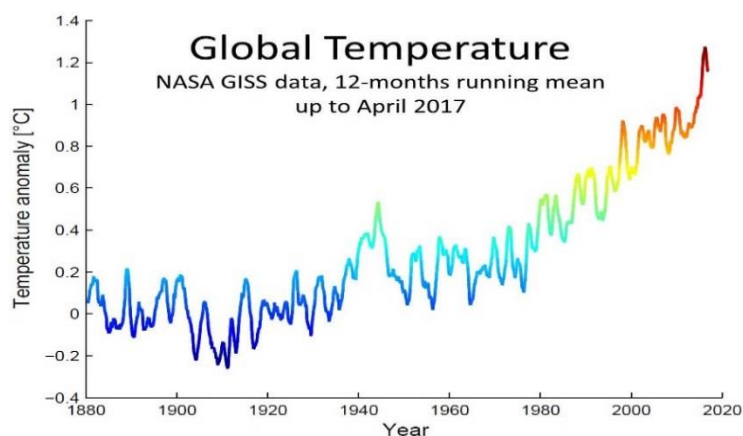
Hinzu kommt in der aktuelleren Entwicklung, dass festgestellt werden kann, dass 16 der 17 wärmsten gemessenen Jahre seit Beginn der Aufzeichnungen alle nach dem Jahr 2000 auftraten, die **fünf wärmsten seit 2010**. Dabei stammen die Höchstmessungen der globalen mittleren Temperaturabweichung³⁰ aus den Jahren 2014, 2015 und 2016 (bei seit 2015 allerdings verstärkend auf die Temperaturerhöhung wirkenden El-Nino-Phänomen³¹).

29 Vgl. IPCC (2012). Kernaussagen des IPCC Sonderberichtes zu Management des Risikos von Extremereignissen und Katastrophen zur Förderung der Anpassung an den Klimawandel: Übersetzung des BMU, BMBF und der Deutschen IPCC-Koordinierungsstelle. Berlin: 1.

30 S. zur Erklärung der Angabe einer Temperaturabweichung und nicht einer absoluten Temperaturangabe das folgende Unterkapitel zur Datenerfassung.

31 Vgl. zu einer Analyse des El-Nino-Ereignisses und des Jahres 2015 z.B. ab S. 81: DWD; Kühl, L.; Lefebvre, C.; Becker, A. (2016). Klimastatusbericht 2015. Aktuelle Ergebnisse des Klimamonitorings: http://www.dwd.de/DE/leistungen/klimastatusbericht/publikationen/ksb_2015.pdf?__blob=publication-File&v=2

Übereinstimmend teilten alle drei Forschungsinstitutionen der drei maßgeblichen globalen Temperaturdatensätze auch 2017 mit, dass **2016 das jeweils wärmste gemessene Jahr seit Beginn der Auswertungen** war. Dabei gibt NOAA³² als Durchschnittswert für 2016 an, dass es **0,92°C**³³ **wärmer** war als das Mittel im 20. Jahrhundert; die NASA meldet **0,99°C** Änderung der globalen Mitteltemperatur gegenüber dem Referenzzeitraum 1951 bis 1980³⁴ und HadCRUT meldet **0,77°C** für 2016.³⁵

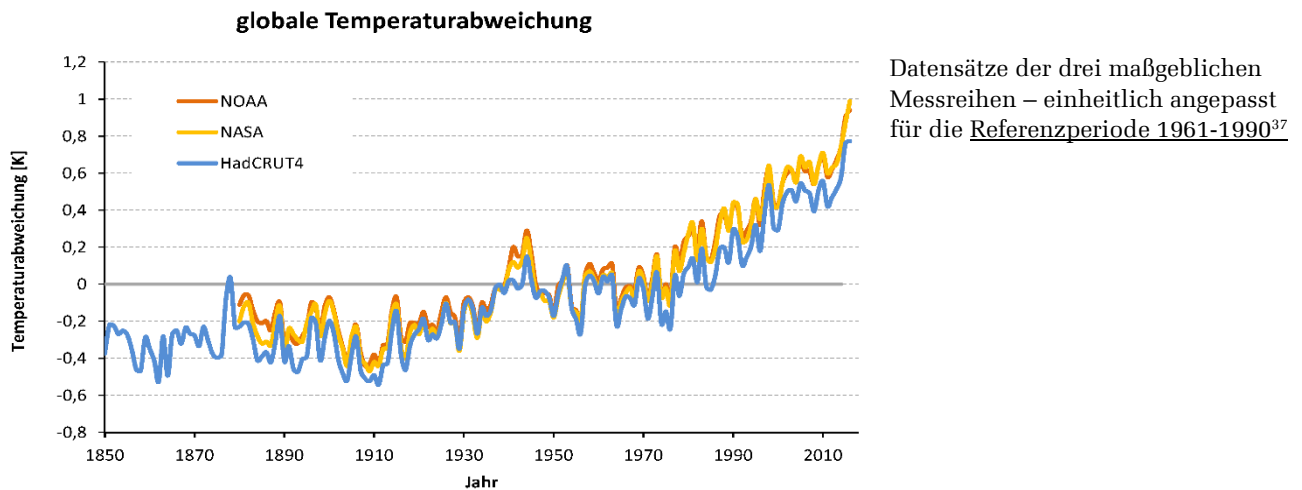


Wird die Temperaturänderung gegenüber dem Referenzzeitraum 1880-1909 gewählt (**gegenüber vorindustriellem Niveau**), ergibt sich bei NASA ein Temperaturanstieg von **1,22°C in 2016**.³⁶

Die NASA-Grafik zeigt ein 12-Monatsmittel, so dass der Mittelwert der Kurve für 2016 ein Punkt der Kurve ist (er liegt fast auf dem Gipfel der Kurve; den Gipfel markiert der Wert für April 2017).

Dass der Temperaturanstieg (angegeben als Temperaturabweichung zu einem jeweiligen Referenzzeitraum) in den drei Datensätzen der nachfolgenden Abbildung variiert, liegt an unterschiedlichen Mess- und Analyseverfahren. Die Grundaussagen zum Verlauf der Temperaturentwicklung sind dabei jedoch stets gleich (s. Abbildung).

-
- 32 NOAA ist die **National Oceanic and Atmospheric Administration** des **National Centers for Environmental Information** der USA. Sie nutzen Daten des Global Historical Climatology Network (GHCN-M) und des International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set (ICOADS).
- 33 Vgl. NOAA (2017). Climate at a Glance: Global Time Series, published July 2017, retrieved on August 17, 201: <http://www.ncdc.noaa.gov/cag/>; 2014 meldete NOAA: 0,77°C, 2015: 0,89°C globale mittlere Temperaturerhöhung.
- 34 Vgl. NASA (NASA's Goddard Institute for Space Studies (GISS)). (2017). Datas since 1880, base period 1951-1980: <https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/>; 2014: 0,74°C, 2015: 0,87°C.
- 35 HAdCRUT ist das **Hadley Center** des **Met Office UK**, das zusammen mit der **Climate Research Unit (CRU)** der University of East Anglia zusammenarbeitet: <http://www.cru.uea.ac.uk/>; als Referenzperiode wird 1961-1990 gewählt: <http://hadobs.metoffice.com/monitoring/index.html>
- 36 Vgl. WMO (2016). COP22 advances global action on climate change. Meteoworld December 2016: <https://public.wmo.int/en/media/news/cop-22-advances-global-action-climate-change>; vgl. NASA/GISS (2017). Zit. nach Rahmstorf, Stefan. April 2017 was second-warmest April on record, beaten only by last year: <https://twitter.com/rahmstorf/status/864183821046091776>



Auch für das laufende Jahrzehnt deuten die Daten bisher daraufhin, dass nicht nur die einzelnen Wärmerekordjahre, sondern auch die Dekade 2011 bis 2020 insgesamt einen neuen Höchststand im Anstieg der Erwärmung markieren könnte.

Der Direktor des Max-Planck-Instituts für Meteorologie, Jochen Marotzke, ordnet die bisherige Erwärmung als zehnmal so schnell im Vergleich zu jedem anderen zuvor sich auf der Erde vollziehenden Klimawandel ein - wenn singuläre Ereignisse wie Asteroideneinschläge oder Supervulkane außen vor gelassen würden. Sehr vereinfacht dargestellt habe die Entwicklung aus der letzten Eiszeit heraus 5.000 Jahre gedauert und sich das Klima in dieser Zeit pro 1.000 Jahre um ca. ein Grad erwärmt. Heute fände ein solcher Temperaturanstieg von einem Grad in ungefähr einem Jahrhundert statt.³⁸

4.1.1.2. Datensätze und Datenerhebung der globalen Mitteltemperatur

Insgesamt beruhen die **Beobachtungen zum Klimasystem** auf direkten Messungen von z.B. Thermometern, Pegelmessungen und Sonnenspektralradiometern oder aber Satelliten³⁹-und Plattformenfernerkundungsmessungen (über Flugzeuge, Boote, zylindrische Schwimmkörper). Beobachtungen im globalen Maßstab durch erste instrumentelle Messungen begannen vor oder Mitte des 19. Jahrhunderts (insbesondere zur Temperatur und zum Meeresspiegel). Zusätzlich werden Paläoklima-Rekonstruktionen (Klimaproxys) anhand indirekter Klimaanzeiger von natürlichen Archiven wie Eisbohrkernen (zu Gaseinschlüssen und Eisdichten), Stalagmiten, Baumrin-

37 Grafik des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Neu angepasst und übermittelt vom DWD per E-Mail am 10.7.2017.

38 Vgl. Marotzke, Jochen (2014). Zit. nach: FocusOnline vom 23.9.2014. Ist der Klimawandel menschengemacht?: http://www.focus.de/wissen/klima/tid-8638/diskussion_aid_234320.html

39 Es werden laut Global Climate Observing System (GCOS) mehr als die Hälfte der ca. 50 gelisteten relevanten Klimavariablen in kompletten Datenerfassungsprogrammen seit den 1990er Jahren über Satellitenmessungen erfasst, was den Vorteil der kontinuierlichen Messung und der Erfassung im globalen Maßstab erlaube.

gen, Korallenwachstum, Pollen, See- oder Ozeansedimenten u.v.m. verwandt, mit denen Messreihen um Hunderte bis zu Millionen Jahre zurück erstellt werden. Dabei muss erst eine Transferfunktion kalibriert und verifiziert hergeleitet werden⁴⁰, damit durch diese Klimaproxyen ein qualitatives Bild über Temperaturen, Niederschläge oder andere vergangene Klimazustände erstellt werden kann. Die Klimawissenschaft beschreibt sich selbst als auf diese Weise in der Lage, über eine - im Rahmen eines differenzierten Umgangs mit Unsicherheiten - umfassende Sicht über die Schwankungen und Langzeit-Veränderungen in der Atmosphäre, dem Ozean, der Kryosphäre und der Landoberfläche zu verfügen.

Seit Mitte des neunzehnten Jahrhunderts (seit 1850 für den englischen globalen Messreihen-Datensatz, ab ca. 1880 für die beiden amerikanischen globalen Messreihen-Datensätze) liegen **weltweite Temperaturmessungen** zur Erhebung einer globalen Durchschnittstemperatur vor. Dabei enthalten die kombinierten Land-See-Datensätze Lufttemperaturmessungen an Landstationen und Wasseroberflächentemperaturen von Schiffen und Bojen. Lange Zeitreihen sind dabei z.T. durch verschiedene nicht-klimatologische Effekte beeinflusst, beispielsweise die Veränderung (Austausch, Verbesserung, Alterung) und räumliche Verlegung von Messinstrumenten, Änderungen in den Beobachtungszeiten und -häufigkeiten oder veränderte Beobachtungsregeln.⁴¹ Entsprechend durchgehende und vereinheitlichte Beobachtungstemperatursätze der unterschiedlichen Messinstitute sind seit ca. 1950 verfügbar⁴². Insgesamt wird den Zeitreihen ab der instrumentellen Messung ein relativ verlässlicher Grad zugewiesen, der durch die Setzung eines späteren Referenzrahmens in der Temperaturentwicklung erreicht wird (s. dazu den dritten folgenden Absatz).

Grundsätzlich ist die Angabe einer tatsächlich/absoluten mittleren globalen Durchschnittstemperatur⁴³ mit größeren Unsicherheiten behaftet, da sich die Schwierigkeit der Absoluteichung, der Absolutkalibrierung stellt. Die Angabe einer gemessenen Abweichung zu einem zuvor bestimmten Wert, der auch ohne Absoluteichung bestimmt werden kann, ist dagegen viel exakter möglich und kann überdies räumliche Besonderheiten wie bei der Bestimmung der globalen Durch-

40 Nach einer Altersbestimmung des untersuchten Archivs und der zeitlichen Einordnung der Proxydaten, wird ein Zeitraum gewählt, für den Daten der gesuchten klimatischen Größe schon vorliegen anhand instrumenteller Messdaten). Die Proxydaten werden sodann an den Messdaten kalibriert (es wird eine funktionale Beziehung, die Transferfunktion, zwischen Proxy- und Messdaten hergestellt). Anhand dieser Transferfunktion werden für einen weiteren Zeitraum, für den ebenfalls schon Daten der gesuchten klimatischen Größe vorliegen, aus den Proxydaten die erwarteten Klimadaten errechnet. Diese so berechneten Daten werden mit den vorliegenden Daten verglichen und es wird geprüft, ob die Berechnung hinreichend genau ist (Verifizierung die Transferfunktion). Vgl. Wikipedia (o.J.). Proxy (Klimaforschung): [https://de.wikipedia.org/wiki/Proxy_\(Klimaforschung\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Proxy_(Klimaforschung)); vgl. auch Max-Planck-Gesellschaft (2005). Forschungsbericht 2005. Neue Wege zum Paläoklima: <https://www.mpg.de/828914/forschungsSchwerpunkt>

41 Vgl. Hoy, A. (2016). Langzeitliche Klimaänderungen in Frankfurt/Main. Datengrundlage und -qualität. In: Klimastatusbericht 2015.

42 Eine Messstation, bei der seit 1893 mit den gleichen Messinstrumenten, am gleichen Standort und nach einheitlichen Bedingungen gemessen wird, ist die Säkularstation Potsdam-Telegrafenberg.

43 NOAA gibt beispielsweise eine mittlere globale Durchschnittstemperatur im dem von den US-Forschern bevorzugten Referenzzeitraum 1951-1980 von 14°C an.

schnittstemperatur vernachlässigen. Daher werden bei den Zeitreihen für die Angabe der Temperaturentwicklung/des Temperaturanstiegs fast durchgängig nur die Abweichungen und nicht deren Absolutwerte bestimmt.⁴⁴

Bei der konkreten Messung wird eine Intrapolierung zwischen den Messergebnissen der unterschiedlichen Messstationen innerhalb einer Fläche vorgenommen. (Auch hier wirkt die Verwendung der Anomalie und nicht eines Absolutwertes schwankungsabfangend und fehlerregulierend.) Starke Abweichungen bei Messungen einzelner Stationen können so besser erkannt und auch aus der Berechnung herausgenommen werden. So genannte städtische Wärmeinseleffekte existieren, sind aber in der Gesamtschau vernachlässigbar im Einfluss auf die globale Mitteltemperatur; zumal in diese auch Messungen aus ländlichen Regionen, Gebirgen und Inseln einfließen und im Messverfahren selbst (wie bei den erwähnten starken Abweichungen) Korrekturen beachtet werden.

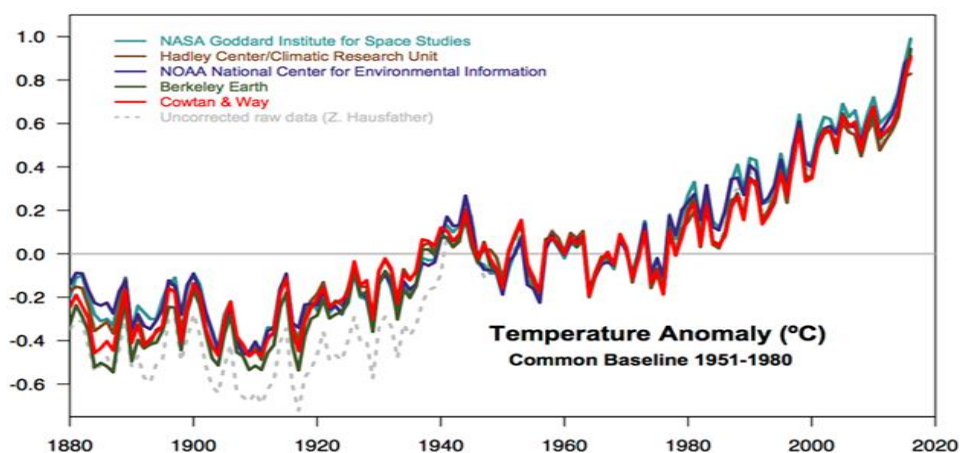
Grundsätzlich werden die bestimmten Temperaturabweichungen als Abweichung zu einem vieljährigen Mittelwert angegeben. Diese Angabe ergibt sich daraus, dass ein Erwärmungsgeschehen nur dann als belastbar in der Aussagefähigkeit erachtet wird, wenn es sich über mehrere Jahrzehnte zeigt; Angaben im Bereich von Jahren und einem Jahrzehnt geben im Allgemeinen keinen Langzeit-Klima-Trend wieder. Daher werden die Temperaturabweichungen zu einem längeren Bezugsrahmen (= Referenzrahmen) und dessen Mittelwert angegeben, der mindestens 30 Jahre betragen sollte, um den mittleren Zustand der Atmosphäre (relativ störungsarm) abzubilden. Die Weltorganisation für Meteorologie der Vereinten Nationen (WMO) schlägt beispielsweise vor, dafür jeweils die mittlere Temperatur zwischen 1951-1980 als Referenzrahmen zu setzen, da sich darin das Klimaänderungssignal gut widerspiegeln. Typisch ist aber auch die Verwendung des Referenzrahmens 1960-1990 (oder 1880-1909), wenn die Gesamthöhe des Temperaturzuwachses gegenüber dem vorindustriellem Niveau verdeutlicht werden soll und nicht so sehr die Kontinuität des Temperaturanstiegs ab einem bestimmten Zeitpunkt.

Die bedeutendsten verwendeten und seit Mitte bzw. Ende des 19. Jahrhunderts durchgehenden Messreihen sind die des Goddard Institute for Space Studies der National Aeronautics and Space Administration (**NASA/GISS**), des National Centers for Environmental Information der National Oceanic and Atmospheric Administration der USA (**NOAA/NCEI**), sowie des Hadley Centre im UK MetOffice mit der University of East Anglia (**HadCUT**), welche in Zusammenarbeit mit der Climatic Research Unit der Universität East Anglia erzeugt wird. Diese drei Zeitreihen verwenden jeweils eine etwas unterschiedliche Datenbasis (z.T. über unterschiedliche Messstationen⁴⁵) und verschiedene Berechnungsverfahren (Verfahren der Intrapolierung) und liefern somit auch leicht unterschiedliche Werte. Als Besonderheit gilt z.B., dass bei den angegebenen Werten der

44 Vgl. Deutscher Wetterdienst (2017). Lexikon. Stichwort „Globale Durchschnittstemperatur“: <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=100932&lv3=101038>

45 Die Stationsdaten (die englischen nur bedingt) werden öffentlich zur Verfügung gestellt.

NASA die Polarregionen einbezogen sind, während Hadley sie (auch auf Grund zu weniger Messstationen) ausklammert⁴⁶. Weitere globale Datensätze wurden von **Cowtan & Way** und im Rahmen des Berkeley Earth Surface Temperature Projektes (Berkeley Earth, **BEST**) erstellt. Letztere Messreihe war aus der Kritik an den Datensätzen der anderen Messreihen gegründet worden und hat mehr Datensätze sowie neue und andere Intrapolationsverfahren zum Einsatz gebracht. In der Gesamtschau und im Rahmen der statistischen Unsicherheit bestätigen alle Datensätze unabhängig voneinander die gleiche Temperaturentwicklung. (S. Abbildung)



Graphik mit allen relevanten genannten Datensätzen, bezogen auf die Referenzperiode 1951–1980⁴⁷

4.1.2. Ozean

4.1.2.1. Erwärmung um ca. 0,5°C in den letzten Jahrzehnten

Die Ozeane haben sich deutlich erwärmt: Es ist „praktisch sicher“, dass sich der **obere Ozean** (0–700 m) von 1971 bis 2010 erwärmt hat, und „wahrscheinlich“, dass er auch zwischen 1870 und 1971 wärmer geworden ist. (6) Auch im tieferen Ozean zwischen 700–2000 m ist eine Erwärmung ab ca. Mitte des letzten Jahrhunderts „wahrscheinlich“.

Am stärksten erwärmt sich die Schichten nahe der Wasseroberfläche. In den oberen 75 m stieg die Temperatur (in dem relativ gut vermessenen Zeitraum) **ab 1971 bis 2010 im Mittel um 0,11°C pro Dekade** (je nach Messreihe um 0,09 bis 0,13). (6) Dabei gibt es auch Seegebiete, in denen die

46 Hadley wird z.T. vorgeworfen, dass sie mit der Ausklammerung - obwohl gerade in der Arktis eine besonders hohe Erwärmung beobachtet wird - nicht wirklich die globale Mitteltemperatur veröffentlichen würde. Die Ausklammerung erklärt die starken Abweichungen im Verhältnis zu den Temperaturanomalieangaben der anderen Institutionen/Messreihen.

47 Grafik vom Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung am 4.7.2017 per E-Mail zugesandt.

Wassertemperaturen in dieser Zeit auf Grund sehr verschiedener Ursachen gesunken sind (wie im Nordatlantik), in anderen stieg die Temperatur hingegen überproportional.

Mit „hohem Vertrauen“ kann davon ausgegangen werden, dass der allergrößte Teil der Energie, die dem Klimasystem zusätzlich zugeführt wurde, in den Ozeanen gespeichert wird: die Ozeane haben insgesamt **93% der globalen Erwärmung aufgenommen**.⁴⁸ (6).

Es ist „sehr wahrscheinlich“, dass seit den 1950er Jahren Regionen mit hohem Salzgehalt, in denen Verdunstung dominiert, salziger geworden sind, während Regionen mit niedrigem Salzgehalt, in denen Niederschlag überwiegt, weniger salzig geworden sind. Bei „mittlerem Vertrauen“ sind diese regionalen Trends des Salzgehaltes der Ozeane ein indirekter Hinweis, dass sich Verdunstung und Niederschlag über den Ozeanen verändert haben. (6).

Aktuellere Daten der Weltorganisation für Meteorologie deuten darauf hin, dass die mittlere globale Oberflächenozeantemperatur 2016, in ihrer Abweichung gemessen, die höchste bisher war. In der nördlichen Hemisphäre wurden beim Wärmegehalt neue Rekordwerte gemessen, während es in der südlichen Hemisphäre etwas kühler war.⁴⁹

4.1.2.2. Messung der mittleren Ozeantemperatur

Die Temperatur der Ozeanoberfläche wird, wie beim Unterkapitel zur Temperaturerfassung dargestellt, üblicherweise über Bojen erfasst. Auch die dortigen Erläuterungen zur Angabe der Temperaturabweichung gelten hier. Es kommen hierbei Thermometer oder Thermistoren zum Einsatz.

Zusätzlich werden Satellitendaten eingesetzt, die über Radiometer die im infraroten (feine räumliche Auflösung) Spektralbereich oder Mikrowellenbereich (wolkenunabhängig) arbeiten.⁵⁰

Seit dem Jahr 2000 liegen zum Wärmeinhalt der Ozeane, zu Zustand wie auch Veränderung, über das sogenannte Argo-Programm sehr genaue Daten vor. Auch andere ozeanografisch klimatologisch relevante Messwerte (wie z.B. Salinität, Tiefenprofil) werden erfasst.

Das Argo-Programm ist eine Kernkomponente des globalen Ozeanüberwachungssystems GOOS. Argo besteht aus einer Flotte von mehr als 3.900 automatisierten Treibbojen (floats), die über alle Ozeane verteilt sind. Diese Messroboter sind relativ klein und wiegen bis zu 30 kg. Alle profilierenden Treibbojen, die zum Argo-Programm gehören, senden die Daten in Echtzeit; sie sind frei zugänglich. Überwiegend treiben die Floats in Tiefen von 1.000 m (der sogenannten Parktiefe)

48 Der Rest verteilt sich zu 3% auf das Schmelzen von Eismassen, 3% auf die Erwärmung der Kontinente und ca. 1% auf die Erwärmung der Atmosphäre.

49 Vgl. WMO (2017). Climate breaks multiple records in 2016, with global impacts. Pressemitteilung Nr. 4 vom 21.3.2017: 2,6: <https://public.wmo.int/en/media/press-release/climate-breaks-multiple-records-2016-global-impacts>

50 Vgl. ICDC (Integrated Climate Data Center, Datenzentrum, Universität Hamburg): <https://icdc.cen.uni-hamburg.de/daten/ocean.html#c1723>

und tauchen alle zehn Tage auf zunächst 2000 m ab, um von dieser Tiefe aus an die Oberfläche aufzusteigen. Während des Aufstiegs zur Meeresoberfläche messen sie Temperatur, Leitfähigkeit und Druck in der Wassersäule. Mit der Hilfe der gemessenen Parameter können dann auch der Salzgehalt und die Dichte des Meerwassers berechnet werden. Bis zu 100.000 Operationen werden pro Jahr durchgeführt.⁵¹

4.1.3. Kryosphäre

4.1.3.1. Zunehmende Masseverluste in Grönland und Antarktis, Ausdehnungsrückgang der Arktis, Gletscherschwund

Der **Masseverlust des Grönländischen Eisschildes** gilt als massiv. Das Eisschild schwindet um 250 bis 300 Milliarden Tonnen pro Jahr. Dies trägt mit jährlich rund 0,6 mm zum Anstieg der globalen Meeresspiegelhöhe bei. Dabei ist die **durchschnittliche Geschwindigkeit** des Eisverlustes des Grönländischen Eisschildes „sehr wahrscheinlich“ beträchtlich von 34 Gt pro Jahr im Zeitraum von 1992 bis 2001 auf 215 Gt pro Jahr im Zeitraum von 2002 bis 2011 **angestiegen** (7), was einer Versechsfachung der abgeschmolzenen Masse entsprechen würde.

Beim **Gletscherschwund** verlieren vier von fünf Gebirgsgletschern, die weltweit von Forschern beobachtet werden, an Eismasse. Unter Einbezug der wenigen Gletscher, die aufgrund regionaler Besonderheiten wachsen, hat die globale Gesamtmasse der Gletscher seit 1980 deutlich abgenommen – im Durchschnitt verschwand eine **Eisschicht von gut 20 Metern Dicke**. Dabei betrug die Geschwindigkeit des Eisverlustes von Gletschern weltweit (ohne die Gletscher am Rande der Eisschilde) für den Zeitraum von 1971 bis 1992 „sehr wahrscheinlich“ 226 Gt pro Jahr und für den Zeitraum 1993 bis 2009 dann 275 Gt pro Jahr. (7, letzter Satz)

Auch die **Ausdehnung der Schneebedeckung auf der Nordhalbkugel nimmt** seit Mitte des 20. Jahrhunderts **ab** – das „Vertrauen“ ist diesbezüglich „hoch“. (7) Aktuell wird konstatiert, dass beispielsweise in den Schweizer Alpen die Schneesaison in den letzten 45 Jahren erheblich kürzer geworden ist - sie beginnt heute durchschnittlich 12 Tage später und endet 26 Tage früher als 1970.⁵²

Beim arktischen Meereis geht die **Maximalausdehnung** am Ende des Winters als auch das Minimum am Ende des Sommers seit Beginn der Satellitenbeobachtung 1979 **stetig zurück**. Dabei betrug die Geschwindigkeit der Abnahme der mittleren jährlichen Ausdehnung von 1979 bis 2012 „sehr wahrscheinlich“ 0,45 bis 0,51 Mio. km² pro Jahrzehnt und des sommerlichen Meereis-Minimums „sehr wahrscheinlich“ 0,73 bis 1,07 Mio. km² pro Jahrzehnt. (7) Am Südpol (**Antarktis**) ist der Trend weniger klar, dort nimmt die **Ausdehnung des Meereises** in bestimmten Gebieten

51 Vgl. ARGO (2017). Internetseite: <http://www.argo.net/>; <http://www.argo.net/>

52 Vgl. G20Climate 2017.

(auf Grund vermuteter veränderter Windmuster, die das Meereis auseinandertreiben, und weiterer Faktoren⁵³) eher **leicht zu** (von 1,2 bis 1,8% pro Jahrzehnt im Zeitraum 1979 bis 2012). Daneben gibt es auch einen **Masseverlust am Antarktischen Eisschild** (vor allem in der Westantarktis und der Halbinsel). Dabei ist die durchschnittliche Geschwindigkeit „wahrscheinlich“ von 30 Gt pro Jahr im Zeitraum von 1992 bis 2001 auf 147 Gt pro Jahr im Zeitraum von 2002 bis 2011 angestiegen (7, vorangehender Satz), was einer Verfünffachung des Masseverlustes entsprechen würde.

Die **Permafrost-Temperaturen** sind in den meisten Regionen seit den frühen 1980er Jahren angestiegen. Die beobachtete Erwärmung betrug (bei Angaben bis Mitte der 2000er Jahre bzw. bis 2010) bis zu 3°C in Teilen des nördlichen Alaskas und bis zu 2 °C in russisch-europäischen Teilen. (7)

Aktuell wird für die **Arktis** festgestellt, dass **2016** die **geringste je** seit 1979 per Satellit **gemessene Winterausdehnung** zu verzeichnen war (14,52 km² am 24.März), ebenso wie auch die sommerliche Meereisbedeckung außergewöhnlich gering war.^{54,55} Von dem Prozess des Schwindens ist nicht nur die Ausdehnung betroffen, sondern auch die Dicke des schwimmenden Eises, so dass auch in kalten Jahren schnell wieder aufgebautes Eis empfindlicher gegenüber warmen Sommern wird und die Arktis im Laufe dieses Jahrhunderts im Sommer mehrere Monate weitestgehend eisfrei sein wird.⁵⁶ Durch den sogenannten Albedo-Effekt erwärmt sich die Arktis gegenwärtig schon doppelt so schnell wie im globalen Durchschnitt. 2016 lag sie im Gebiet der hohen Arktis

53 S. zur ausführlicheren Erklärung einer Signifikanz der Eiszunahme in der Antarktis und zur Diskussion ihrer Einordnung (ggf. gibt es die Ausdehnung nicht nur trotz, sondern auch wegen des globalen Klimawandels): Notz, Dirk, Hamburger Max-Planck Institut für Meteorologie (2015). Das Meereis in der Antarktis. In: Lozán, J. L. u.a. (Hrsg.). Warnsignal Klima: Das Eis der Erde (204-209): <http://www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de/eis-der-erde/eis-der-erde-buch-kap-5-4/>. Siehe auch: ScepticalScience (2015). Is Antarctica gaining or losing ice? <https://skepticalscience.com/antarctica-gaining-ice-intermediate.htm>

54 Vgl. WMO (2017): 17.

55 Gemessen werden in den Polarregionen z.B. bei der Forschung zum Meereis Eisdichten, Strahlungsbilanzen und Meereigenschaften. Dafür werden zum einen Satellitendaten (Messungen per Radar) genutzt. Außerdem finden standardisierte Beobachtungen mittels Schiffen, Flugzeugen, Unterwasserfahrzeugen zu Eiskonzentrationen, Eisbrechung und Schneebedeckung statt sowie gleichfalls Messungen zur Eisdicke, per Sensor im elektromagnetischen Verfahren (per Electromagnetic Bird) kilometerlang und direkt über der Eisfläche, sowie zusätzlich Eisbohrkernuntersuchungen. Vgl. Alfred-Wegener-Institut (2017). Lasst uns über Meereis sprechen. Interview mit Dr. Marcel Nicolaus vom 21.02.2017: <https://www.awi.de/im-fokus/meereis/artikel/podcast-zur-meereisforschung.html>

56 Der Albedo-Effekt bezeichnet den Umstand, dass durch das Schmelzen von Eis (oder hellerer Schneebedeckung) die frei werdenden (an der Arktis) dunkleren (Wasser-)Oberflächen die eintreffende Sonnenstrahlung/Energie weniger reflektieren als die zuvor helleren Flächen, sie sie also absorbieren und sich so die Erwärmung erhöht, was in einer Rückkopplung wiederum das Schmelzen verstärkt. Der gleiche Effekt trifft auch für das Schmelzen auf dem grönländischen Festland zu. Vgl. BMBF (2015). In vierzig Jahren könnte die Arktis eisfrei sein: <https://www.bmbf.de/de/in-vierzig-jahren-koennte-die-arktis-eisfrei-sein-1144.html>; vgl. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (2017). Kippelemente – Achillesfersen im Erdsystem: <https://www.pik-potsdam.de/services/infothek/kippelemente>.

Direkte Auswirkungen auf den Meeresspiegelanstieg sind durch das Schmelzen der Arktis, da es sich um Meereis handelt, nicht zu erwarten, nur die indirekten Wirkungen auf den Meeresspiegelanstieg über ihre Verstärkung der Erwärmung und damit die Ausdehnung der Ozeane. (S. dazu auch Kapitel 4.3)

im Jahresmittel sogar 6,5°C (+1,6°C über dem vorangehenden Rekord) über dem Mittel des Referenzzeitraums 1961 bis 1990. Auch in der Antarktis wird für 2016 im Gegensatz zu den Jahren zuvor eine hohe Abnahme beim Meereis konstatiert.⁵⁷ Auch insgesamt wurde im Winter 2016/17 bei der globalen Meereisfläche (Nord- und Südpol kombiniert) ein Rekordminus verzeichnet.⁵⁸

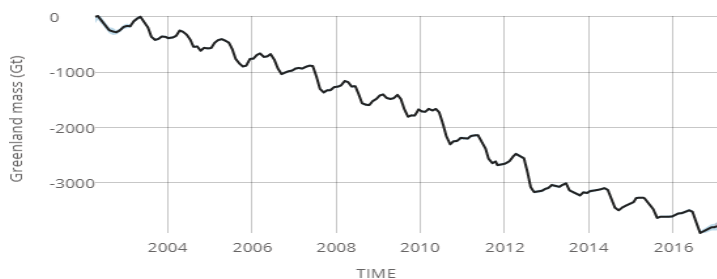
Zudem setzt sich auch der **Eismasseverlust Grönlands** in den letzten Jahren nicht nur fort, sondern **beschleunigt sich** (vor allem an den Rändern) **weiter**. Die NASA konstatiert **2016** eine durchschnittliche Rate des Masseverlusts von 286 Gt (+21) pro Jahr.

Greenland

SATELLITE DATA: 2002-PRESENT

Data source: Monthly measurements. Credit: JPL

RATE OF CHANGE
↓ 286
(± 21) Gt/yr



Eismasseverlust Grönlands laut NASA, erstellt aus Daten des NASA/German Aerospace Center's twin Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE)- Satellitenprogramms⁵⁹

Viele aktuelle Studien gehen davon aus, dass das **Westantarktische Eisschild** durch unterschiedliche Prozesse bereits tatsächlich **instabil geworden** zu sein scheint, und der „collaps“ für dieses Teilgebiet, der dann einen jahrhundertedauernden unstoppbaren Schmelzprozess einleiten würde, damit im Prozess des Beginns ist.⁶⁰ (S. zur Einordnung und den möglichen Auswirkungen Kapitel 5.3).

57 Vgl. WMO (2017): 6,5,

58 Vgl. G20Climate (2017).

59 Vgl. NASA (2017). Sea level: <https://sealevel.nasa.gov/>; NASA (2017). Greenland ice loss 2002-2016. Aug. 2016: <https://sealevel.nasa.gov/resources/89/greenland-ice-loss-2002-2016>

60 Vgl. zu beidem Rahmstorf, Stefan in vielen Beiträgen, z.B. Potsdamer Neueste Nachrichten (PPN) vom 9.11.2016. Und s. auch IPCC 2013/2014 Fünfter Sachstandsbericht: danach könnte im Bereich des Erwärmungsanstiegs ab gut 1°C bis 3°C eine Instabilität Grönlands erreicht werden. O'Neil u.a. 2017 geben den Bereich im „Burning embers“-Diagramm für das mögliche Kippen des grönländischen Eisschildes ab ca. 1,5°C bis ca. 4°C an.

Einige Forscher wie Stefan Rahmstorf weisen zudem darauf hin, dass eventuell auch für das Grönländische Eisschild der Kipppunkt (s. zur Erklärung Kapitel 5.2.2) bald erreicht oder gar schon überschritten sein könnte, der zu einem dann unaufhaltsamen, aber Jahrhunderte bis Jahrtausende dauernden gänzlichen Schmelzen des Eisschildes führen würde.

4.1.4. Meeresspiegel

4.1.4.1. Anstieg seit Beginn des letzten Jahrhunderts um ca. 20 cm, Anstiegsrate derzeit bei 3,4 mm pro Jahr

Der globale mittlere Meeresspiegel **stieg im Zeitraum von 1901 bis 2010 um ca. 20 cm**. Der **mittlere Anstieg** betrug statistisch dieser Zeit etwa **1,7 mm pro Jahr**.⁶¹ Während der letzten 2.000 Jahre vor Beginn des Industriezeitalters schwankte der Meeresspiegel eher um Zehntel cm⁶².

Von 1993 bis 2017 (seit der Beginn der umfangreichen Satellitenmessungen) hat der Meeresspiegel **um ca. 80mm⁶³ zugenommen**. Dabei betrug die **jährliche Anstiegsrate** zwischen 1993 bis 2012 im globalen Mittel ungefähr **3,2 mm pro Jahr** ($\pm 0,4$ mm). (9, letzter Satz), was einer Verdopplung gegenüber dem Durchschnittswert des Gesamtanstieges für das Jahrhundert entspricht.

Die signifikante Zunahme der Gesamtentwicklung über das Jahrhundert war stärkeren Dekadenschwankungen ausgesetzt. Beim Anstieg zeigt sich zudem eine starke räumliche Verschiedenheit, so dass der Meeresspiegel insgesamt global deutlich ansteigt, aber nicht überall gleich stark: Es gibt Regionen mit niedrigeren (oder vereinzelt fallenden⁶⁴) und solche mit höheren Werten. Im westlichen Pazifik beträgt die Anstiegsrate beispielsweise bis zu 12 mm pro Jahr.

Größte Ursache für den Meeresspiegelanstieg ist die thermische Expansion, also die Ausdehnung des Ozeans in Folge der Erwärmung; hinzu kommen als wichtige Ursachen die Tauprozesse, also

Vgl. auch Motta, Rob; White, James; Nerem, Steven (2016). Ten things you should know about sea level rise. Colorado University, NASA. In: Washington Post vom 20.5.2016: https://www.washingtonpost.com/news/capital-weather-gang/wp/2016/05/20/10-things-you-should-know-about-sea-level-rise-and-how-bad-it-could-be/?utm_term=.6178aa62fd9e

Hinweise auf das mögliche Überschreiten der Schwelle zur Instabilität der Westantarktis geben z.B. Joughin Ian u.a. (2014). Marine Ice Sheet Collapse Potentially Underway for the Thwaites Glacier Basin, West Antarctica. In: Science vom 12.5.2015: <http://science.sciencemag.org/content/early/2014/05/12/science.1249055.full>

61 Bei den Angaben handelte sich um verschiedene Auswertungen von Pegeldata. Diese zeigen für das 20. Jahrhundert einen Meeresspiegelanstieg von 1,7 mm pro Jahr. Für das gesamte Jahrhundert werden daher 17 cm Meeresspiegelanstieg gesetzt; zwischen 1880 bis 2009 ergeben sich 21 cm.

62 Vgl. Cazenave, A.; Remy F. (2011). Sea level and climate: measurements and causes of changes. In: WIREs Climate Change 2 (647-662): (<http://wires.wiley.com/WileyCDA/WiresArticle/wisId-WCC139.html>)

63 G20Climate nennen 85 mm und eine jährliche aktuelle Anstiegsrate von 3,4 mm.

64 Vgl. zu den genaueren Erklärungen für die räumlichen Unterschiede: IPCC (2014). Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Frequently Asked Questions: 57f. = Fragenkomplex 13.1. Daneben spielen auch für den Ausfall des regionalen Meeresspiegelanstiegs Faktoren wie die Anhebung oder das Absinken von Land (auch verursacht durch direkte Eingriffe des Menschen) oder Änderungen von Wind- und Meeresströmungen eine Rolle. (Siehe zu den Landsenkungen auch Kapitel 5.3).

das Abschmelzen von Gletschern und Eisschilden. Daneben spielen noch Wasseraustauschprozesse zwischen Land und Ozeanen eine Rolle. Seit den frühen 1970er Jahren erklären beide Ursachen zusammen bei „hohem Vertrauen“ ungefähr 75% des beobachteten mittleren globalen Meeresspiegelanstiegs. Und im Zeitraum von 1993 bis 2010 stimmt der mittlere globale Meeresspiegelanstieg mit „hohem Vertrauen“ mit der Summe der beobachteten Beiträge der thermischen Ausdehnung der Ozeane aufgrund der Erwärmung (1,1 mm pro Jahr), der Veränderungen der Gletscher (0,76 mm pro Jahr), des Grönländischen Eisschildes (0,33 mm pro Jahr), des Antarktischen Eisschildes (0,27 mm pro Jahr) und der Wasserspeicherung an Land (0,38 mm pro Jahr) überein. (9).

Die aktuelle Entwicklung seit 2010 wird in den Jahresdaten als schwankend beschrieben, über die Ursachen wird in der Forschung diskutiert. Insgesamt wird aber von einem mindestens **fortgesetzten oder auch wahrscheinlich beschleunigten Meeresspiegelanstieg seit 2010** ausgegangen.⁶⁵ Entsprechend könnte die Anstiegsrate für das laufende Jahrzehnt über der Rate der letzten beiden Jahrzehnte (3,2 mm) liegen. In der Übersicht gibt die NASA die durchschnittliche Anstiegsrate (gegenüber 1992) bei 3,4 mm pro Jahr an (s. Abbildung).

Global Mean Sea Level

Globaler Meeresspiegelanstieg, veröffentlicht von der NASA⁶⁶

SATELLITE DATA: 1993 - PRESENT

Data source: Satellite sea level observations. Credit: JPL/PO.DAAC

RATE OF CHANGE

↑ 3.4

(± 0.4) mm/yr



65 Vgl. zu näheren Erläuterungen: Yi, S.; Sun, W; Heki, K.; Qian A. (2015). An increase in the rate of global mean sea level rise since 2010. In: Geophysical Research Letters, 10.1002/2015GL063902: http://www.ep.sci.hokudai.ac.jp/~heki/pdf/Yi_etal_GRL2015.pdf. Die Autoren konstatieren seit 2010 eine Beschleunigung des Anstiegs: für drei der fünf Jahre bis 2015 betrage die Anstiegsrate 4,4 ±0,5.

66 Vgl. NASA (2017). Global Mean Sea Level. SATELLITE DATA: 1993 – PRESENT: <https://sealevel.nasa.gov/>

4.1.4.2. Datenerhebung zum Meeresspiegel⁶⁷

Der Meeresspiegel wird traditionell über Pegelmessungen (Tidenmessung) und zusätzlich über Satellitenmessungen bestimmt. Über noch längere Zeiträume kann der Meeresspiegel aus Sedimentdaten rekonstruiert werden.

Pegelmessstationen messen seit mehr als einem Jahrhundert weltweit und an vielen hundert Stellen täglich Höchst- und Niedrigststände an Festlandküsten und Inseln im Ozean. Die ersten Messungen begannen in Nordeuropa schon im 18. Jahrhundert, dann kamen Pegel an den Küsten von Nordamerika, Australien, Neuseeland und anderen Kontinenten hinzu. Im frühen 20. Jahrhundert wurden Pegelmessungen auch auf küstenfernen Inseln im Ozean eingeführt. Bei der Messung selbst kommt eine Vielzahl von manuellen und automatischen Sensoren am Pegel wie Schwimmer, Drucksonden, Druckluftwaagen, Radar- und Ultraschallgeräte zum Einsatz. Die Messungen werden auf Pegelbögen, einem Bandschreiber und/oder in digitalen Datensammlern registriert. Mit dem Pegelstand kann dabei nur der relative Meeresspiegelanstieg zum umgebenden Land genau gemessen werden, also zum Verhältnis zur Küste. Ein Problem dabei ist, dass sich nicht nur der Meeresspiegel, sondern auch die Höhe des Landes verändern kann (z.B. als Landabsenkung/-hebung). Zur Angabe einer Meeresspiegeländerung (über Pegeldata) wird ein globales Mittel kalkuliert, zusätzlich werden saisonale Differenzen beachtet und Landhebungs- oder Senkungsprozesse korrigierend eingerechnet.

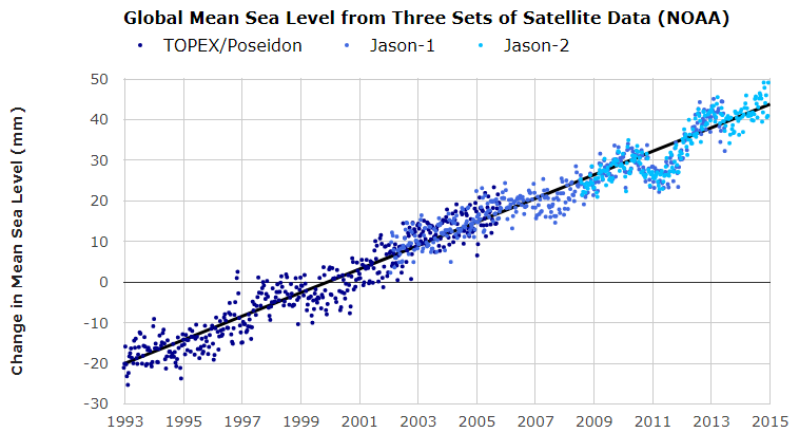
Seit den frühen 1990ern stehen zudem die Satellitenmessungen zur Verfügung. Sie erlauben eine deutlich genauere Bestimmung des mittleren globalen Meeresspiegels. Gemessen wird die Entfernung zwischen Satellit und Meeresoberfläche über elektromagnetische Wellen (Altimetermessungen), indem die Rückmeldegeschwindigkeit und -intensität eines Laserimpulses in Richtung Ozean gemessen wird. Je höher der Meeresspiegel ist, desto schneller und stärker ist das Rücksignal. Messverzerrungen durch tektonische Bodenbewegungen sind dadurch ausgeschlossen. Auch kann die gesamte Ozeanoberfläche so abgedeckt werden. Eine Schwierigkeit für mögliche Messungsgenauigkeiten besteht lediglich im unterschiedlichen Wasserdampfgehalt der Troposphäre, der den Weg der elektromagnetischen Wellen der Satelliten beeinflusst.

Daten liefern seit 1991 die Satellitenprogramme ERS-1, seit 1992 (bis 2005) das TOPEX/POSEIDON-Projekt mit seinen Nachfolgeprogrammen Jason-1 (2001-2013) und Jason-2 (seit 2008) und seit Januar 2016 Jason-3⁶⁸. Seit 1992 bestimmen zudem zwei Satelliten des GRACE-Projekts von NASA und DLR das Schwerefeld der Erde mit bisher nicht da gewesener Genauigkeit und schätzen Massenverlagerungen z.B. von den Eisschilden auf Grönland und der Antarktis hin zu

67 Vgl. zu den nachfolgenden Ausführungen: Yang, Jun u.a. (2012). The role of satellite remote sensing in climate change studies. *Nature Climate Change* 3, 875–883: <http://www.nature.com/nclimate/journal/v3/n10/full/nclimate1908.html>; vgl. Lindsey, Rebecca; Climate GOV US (2016). Climate Change: Global Sea Level: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-sea-level>; Vgl. Klimafakten-Internetportal (2017). <https://www.klimafakten.de/behauptungen/behauptung-der-meeresspiegel-steigt-gar-nicht>

68 Vgl. NASA (2017). 25-years of-global sea level data and counting 22. Aug. 2017: <https://sealevel.nasa.gov/news/90/25-years-of-global-sea-level-data-and-counting>

den Ozeanen ab. Dabei wird der Abstand zwischen den zwei hintereinander fliegenden Zwillingssatelliten mittels Mikrowellen-Funkstrecke gemessen⁶⁹. Ende 2017 wird GRACE Follow starten.⁷⁰ Zusätzlich werden die Satellitendaten mit denen des Pegelnetzwerkes abgeglichen.



Daten der drei Satellitensets mit paralleler (TOPEX und Jason I sowie Jason I und Jason II) und saisonaler Datenerhebung zum Meeresspiegelanstieg⁷¹

4.1.5. Biogeochemische Kreisläufe

4.1.5.1. Anstieg der CO₂-Konzentrationen um 40%, Versauerung der Ozeane

Seit 1750 sind die atmosphärischen Konzentrationen der Treibhausgase **Kohlendioxid (CO₂)**, **Methan (CH₄)** und **Lachgas (N₂O)** jeweils **um 40%, 150% und 20% gestiegen**⁷². Im Jahr 2011 betragen die Konzentrationen von CO₂ 391 ppm⁷³ (parts per million) (**vorindustrieller Wert = 280 ppm**), von CH₄ 1803 ppm (parts per billion) (vorher 715 ppm) und von N₂O 324 ppb (vorher 270 ppb). (10)

69 GRACE misst die Massenveränderungen, indem es deren Effekt auf das Satelliten-Duo aufzeichnet, das mit 220 Kilometer Abstand hintereinander unseren Planeten umkreist. Wird ein Satellit schneller, weil er als erstes auf ein massereiches Objekt zufliegt, vergrößert sich der Abstand um den Bruchteil einer Haaresbreite. Mittels Mikrowellen können diese Änderungen gemessen werden: Die Satelliten senden sich wechselseitig Pulse zu und registrieren, wann die Wellen zurückgestrahlt werden. Hinzu kommen GPS-Sensoren an Bord sowie Beschleunigungsmesser, um die Überflughöhe zu bestimmen und Bremsseffekte zu erkennen, die etwa durch Reibung an atmosphärischen Teilchen entstehen. Aus all diesen Daten errechnen die Forscherinnen und Forscher monatliche Karten der regionalen Änderungen der Erdanziehungskraft und der daraus resultierenden Veränderungen der Massen an der Oberfläche.

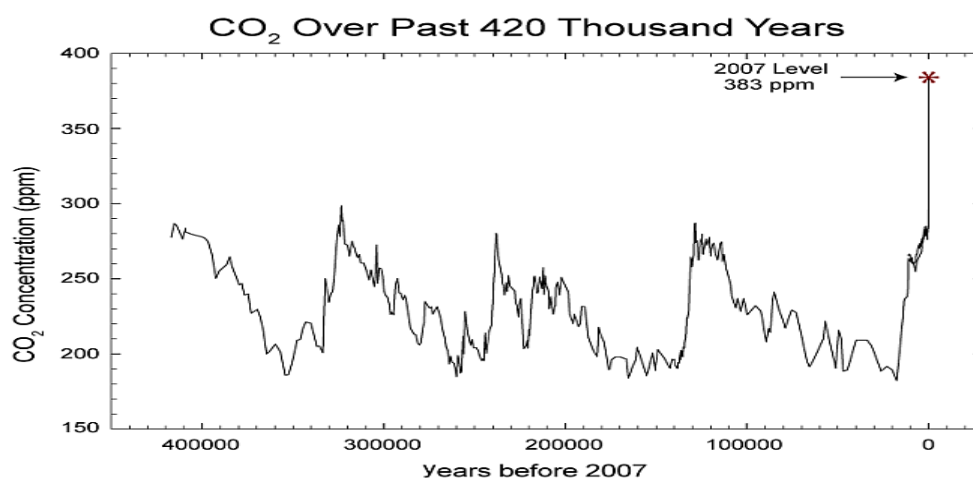
70 Vgl. DLR (2017). GRACE - Gravity Recovery and Climate Experiment. Fliegende Mission; http://www.dlr.de/rb/desktopdefault.aspx/tabid-6813/11188_read-6309/

71 Laboratory for Satellite Altimetry/Sea Level Rise”: US-Department of Commerce; Department of Energy; Daten nach NOAA 2015: http://cdiac.ornl.gov/trends/sea_level.html; vgl. auch: NOAA (2015). Global Mean Sea Level – Graph: <https://www.climate.gov/maps-data/dataset/global-mean-sea-level-graph>

72 Zu den Treibhausgasen gehören noch: PFKW (perfluorierte Kohlenwasserstoffe), HFKW (teilweise halogenierte Kohlenwasserstoffe, NF₃ (Stickstofftrifluorid) und SF₆ (Schwefelhexafluorid). (S. dazu auch Kapitel 6.2.1)

73 = Anteil der Zahl von Gasmolekülen in Bezug auf die Gesamtzahl der Moleküle in trockener Luft. So bedeuten 300 ppm 300 Moleküle eines bestimmten Gases pro Million Moleküle trockene Luft.

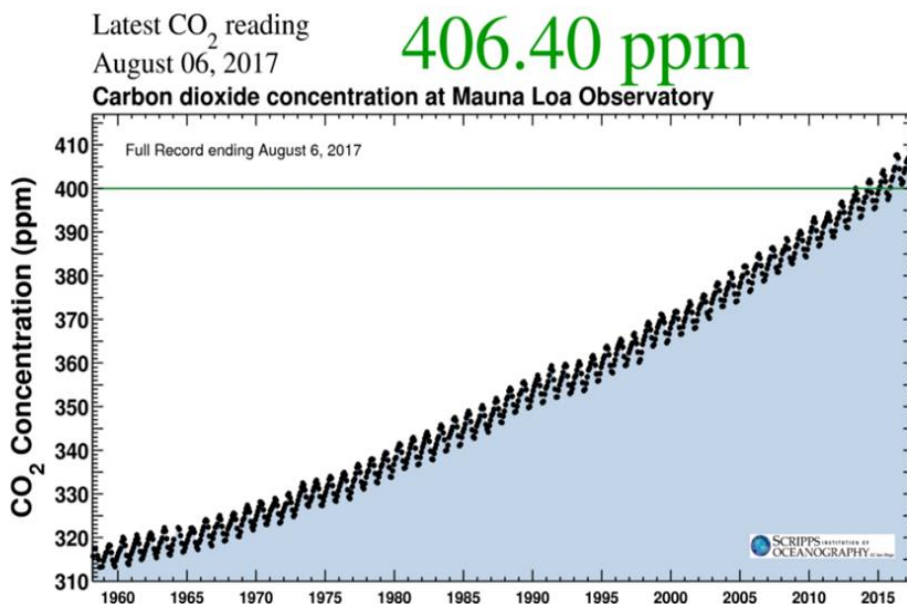
Die Konzentrationen von CO₂, CH₄ und N₂O sind in der Atmosphäre damit auf Werte angestiegen, die seit mindestens den letzten 800.000 Jahren nicht vorgekommen sind. Dies belegen in Eismassen eingeschlossene Luftblasen aus Eisbohrkernen. Außerdem kann „mit sehr hohem Vertrauen“ festgestellt werden, dass ihre mittleren Zuwachsraten in den letzten 22.000 Jahren noch nie so hoch waren wie heute. (10) Darüber hinaus war der CO₂-Konzentrationswert über die gesamte Zeit des Holozäns, also ungefähr der letzten 10.000 Jahre⁷⁴, sehr stabil um die 280 ppm und im erdgeschichtlichen Kontext war das Konzentrationsniveau des Kohlendioxids in der Atmosphäre seit 420.000 Jahren zwar schwankend, aber nie höher als 280 ppm, also dem Ausgangswert vor der Industrialisierung.⁷⁵



Verlauf der atmosphärischen Kohlenstoffdioxid-Konzentration der letzten 420.000 Jahre (nach Eis- und Warmzeiten), rekonstruiert aus dem Klimaarchiv des Vostok Eisbohrkerns; Daten nach SCIPPS-Institute⁷⁶

Der Kohlendioxid-Gehalt der Atmosphäre hat auch seit 2011 weiter zugenommen. Laut Messungen der Referenzstation Mauna Loa auf Hawaii lag der Wert des Kohlendioxid-Gehalts der Atmosphäre 2015 erstmals **über 400 ppm**, im **August 2017** lag er bereits bei **406 ppm**.⁷⁷

-
- 74 Das Holozän ist die seit mehr als 11.000 Jahren andauernde warmzeitliche Epoche des Eiszeitalters. Das Holozän gilt insgesamt als eine sehr stabile Phase in der Erdgeschichte, die vielfach als positive Voraussetzung für die Entwicklung der menschlichen Hochkulturen gesehen wird. Sie wird daher oft als wichtige Referenzgröße in den Klimawissenschaften verwandt.
- 75 Vgl. Petit; J.R. u.a. (1999). Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. In: Nature 399 (429-436).
- 76 Scripps (2017). SCRIPPS CO₂-Program: http://scrippscs2.ucsd.edu/history_legacy/keeling_curve_lessons
- 77 Die Messungen an der Mauna Loa-Messstation können abgerufen werden unter: <https://scripps.ucsd.edu/programs/keelingcurve/>. Eine Übersicht über die CO₂-Konzentrationen der letzten 800.000 Jahre ist ebenfalls bei Scripps abrufbar: https://scripps.ucsd.edu/programs/keelingcurve/wp-content/plugins/sio-blumoon/graphs/co2_800k



Dabei zeigen die Daten sowohl das einheitlich auftretende saisonale Muster der CO₂-Konzentration zum Pflanzenwachstum im Frühjahr und Verblühen ab dem Herbst in der nördlichen Hemisphäre (s. auch nächstes Kapitel), als auch den regulären langfristigen Anstieg der CO₂-Konzentration; Daten nach SRIPPS (2017)
78

Insgesamt wurde von 1750 bis 2011 ein Gesamtbetrag von 555 GtC anthropogenen Emissionen freigesetzt. Davon blieb etwas weniger als die Hälfte (240 Gigatonnen Kohlenstoff) in der Atmosphäre und trug zum menschengemachten Treibhauseffekt bei. Der Rest wurde etwa jeweils zur Hälfte vom Ozean (155 Gigatonnen Kohlenstoff) und von Böden und Pflanzen (160 Gigatonnen Kohlenstoff) aufgenommen und dort gespeichert. (10)

Quellen der angestiegenen Treibhausgase sind neben der Nutzung fossiler Rohstoffe/Brennstoffe (Kohle, Erdöl und Erdgas) vor allem veränderte Landnutzungen (s. dazu Kapitel 6.2.2) und die Chemieproduktion. Dabei betragen die jährlichen CO₂-Emissionen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe und der Zementproduktion bei „hohem Vertrauen“ von 2002 bis 2011 durchschnittlich 8,3 Gt Kohlenstoff (C) pro Jahr (mehr als 50% über dem Niveau von 1990), aus anthropogenen Landnutzungsänderungen bei „mittlerem Vertrauen“ ca. 0,9 GtC pro Jahr. (10, letzter Satz).

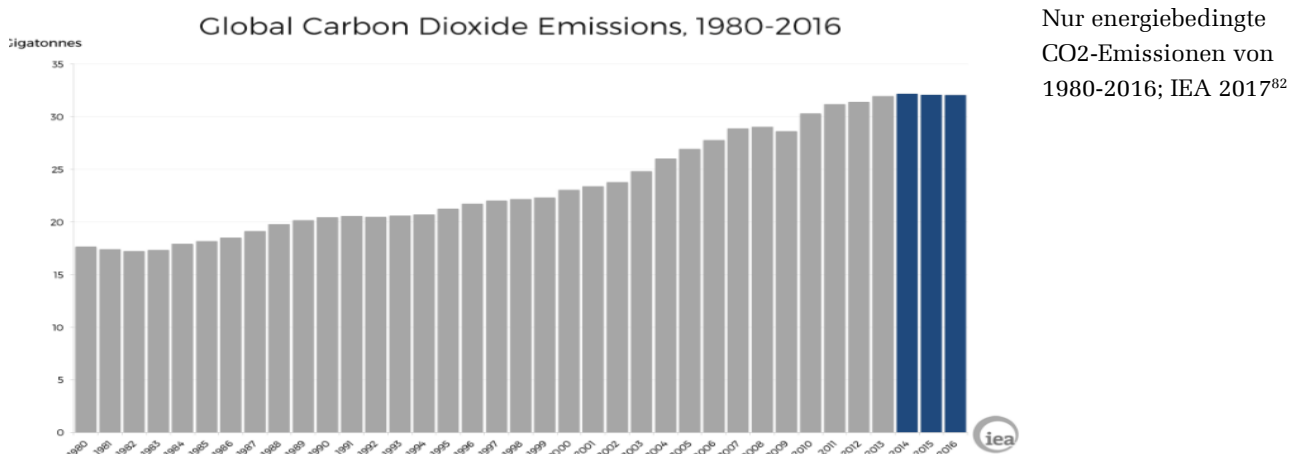
Durch die Aufnahme des emittierten Kohlendioxids durch den **Ozean** hat dieser eine Versauerung erfahren. Dabei sind 30% des emittierten CO₂ von den Ozeanen aufgenommen worden. Der pH-Wert der Meeresoberfläche liegt aktuell im weltweiten Mittel bei etwa pH 8,1 und ist damit gegenüber der vorindustriellen Zeit bei „hohem Vertrauen“ **um rund pH 0,1 gesunken**.⁷⁹ Der aktuell beobachtete Anstieg des CO₂-Gehalts der Ozeane wird, was Ausmaß und Geschwindigkeit

78 Scripps Institution of Oceanography (SCRIPPS) (2017). Carbon dioxide concentration at Mauna Loa Observatory. Latest Reading August 6, 2017: https://scripps.ucsd.edu/programs/keelingcurve/wp-content/plugins/sio-blumoon/graphs/mlo_full_record.png

79 Vgl. G20Climate 2017.

betrifft, in der Evolutionsgeschichte von vielen Wissenschaftlern als seit vielen Millionen Jahren einmalig beschrieben.⁸⁰

Aktuell wurde für die energiebedingten CO₂-Emissionen im März 2017 eine Stagnation zum dritten Jahr in Folge (bei einem Stand von 32 Gt) festgestellt – bei positiven Wachstumsraten von ca. 3%.⁸¹ Sollte tatsächlich der „Peak“, die Spitze, für die gesamten CO₂-Emissionen in Reichweite sein, würde dennoch die Konzentration des CO₂ in der Atmosphäre für viele Generationen auf Grund der Langlebigkeit des Gases nicht unter das heutige Niveau absinken. Aufgrund der Verzögerung des Wirkeintritts des bereits heute schon emittierten und noch nicht ‚klimawirkenden‘ CO₂s, würde sogar trotzdem mit einer auch noch ansteigenden Erwärmung zu rechnen sein.



- 80 Die Zeitangaben schwanken allerdings sehr. Genaue Einschätzungen zu vorherigen pH-Werten und ihren Umständen sind schwierig, sie hängen von den CO₂-Konzentrationen, der Temperatur und der chemischen Zusammensetzung des Wassers ab. Eine systematische Messung des pH-Wertes erfolgt seit gut 30 Jahren vor allem über die globalen Messkampagnen: JGOFS (für Joint Global Ocean Flux Survey) und WOCE (World Ocean Circulation Experiment). Einig sind sich die Fachwissenschaftler, dass die gegenwärtige Entwicklung als durchaus gefährlich einzuschätzen ist, weil mit einer deutlichen Zunahme der Versauerung gerechnet wird und man nicht weiß und auch noch nicht ausreichend (auf Grund unzureichender bisheriger Forschung) ableiten kann, wie die Meereswelt vor allem in punkto Erhalt der Artenvielfalt auf diese massive Veränderung reagieren wird. Vgl. auch: Ozeanversauerung. Aktueller Begriff 16/17 der Wissenschaftlichen Dienste des Deutschen Bundestages. 26. Mai 2017 <https://www.bundestag.de/blob/508708/fb155bd90800d38d00eaae5663a04aec/ozeanversauerung-data.pdf>
- 81 Vgl. zum Ziel des Pariser Abkommens, bis zum Ende des Jahrhunderts die globale Erwärmung auf deutlich unter Zwei-Grad C begrenzen zu wollen und dafür in naher Zukunft die Spitze der CO₂-Emissionen erreichen zu wollen: Gesetzentwurf der Bundesregierung, Entwurf eines Gesetzes zu dem Übereinkommen von Paris vom 12. Dezember 2015. BT-Drs. 18/9520 vom 5.9.2016: <http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/18/095/1809520.pdf>
- 82 Vgl. IEA (2017). IEA finds CO₂ emissions flat for third straight year even as global economy grew in 2016. News vom 17.3.2017: <https://www.iea.org/newsroom/news/2017/march/iea-finds-co2-emissions-flat-for-third-straight-year-even-as-global-economy-grew.html>

4.1.5.2. Messung der CO₂-Konzentration

Seit 1958 gibt es das erste globale Messprogramm für CO₂-Konzentrationen vom US-National Weather Service am SRIPPS-Institut of Oceanography, aufgenommen von Charles David Keeling. Die ersten Stationen wurden auf dem auf Hawaii gelegenen Vulkan Mauna Loa, in der Antarktis und in Kalifornien - jeweils fernab störender Kohlenstoffdioxid-Quellen – eingerichtet; so sind bis heute Verunreinigungen sehr leicht, wegen der dann hohen Amplitude, identifizierbar. Mit einem nicht-dispersiven Infrarotsensor wurden und werden bis heute Flaschenmessungen (kombiniert mit kontinuierlichen Messungen an weiteren Standorten und Tall-Tower-Messungen z.B. auf Fernsehtürmen) vorgenommen. Dafür wird die vorher gesammelte Luft in eine zylindrische Zelle gepumpt und an einem Fensterende Infrarotlicht transmittiert. Da CO₂ Licht im infraroten Spektralbereich absorbiert, kann mithilfe des Intensitätsverlustes des Lichtes nach dem Passieren der Zelle auf die in der Zelle vorliegende CO₂-Konzentration geschlossen werden. Die Messunsicherheit dieses Verfahrens betrug zu Beginn +/- 0,3 ppm und beträgt heute +/- 0,1 ppm.⁸³

Der erste Messwert 1958 betrug 313 ppm CO₂. Im weiteren Verlauf wuchs der Anstieg der CO₂-Konzentration als so genannte Hintergrundkonzentration kontinuierlich. Erkennbare Schwankungen konnten auf die jahreszeitlich wechselnde Wachstumsperiode der Vegetation zurückgeführt werden. (Während des nördlichen Frühlings mit erheblich mehr Pflanzen auf der Nordhalbkugel wird daher mehr CO₂ aus der Atmosphäre gebunden als während des nördlichen Herbstes, wenn südlich des Äquators das stärkste Wachstum auftritt.) Betrug die jährliche Anstiegsrate zwischen den Jahren 1959 und 1969 im Mittel 0,86 ppm, so lag sie in der Zeit zwischen 2000 und 2010 bei durchschnittlich etwa 2 ppm.

Dass es sich bei dem gemessenen CO₂ hauptsächlich um CO₂ aus der Verbrennung der fossilen Brennstoffe handelt, kann mathematisch belegt werden. Denn der gemessene Konzentrationsanstieg entspricht in etwa dem durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe erwarteten Anstieg. Zum anderen belegen Isotopenuntersuchungen bei den Kohlenstoffatomen eine entsprechende Zuordnung/Herkunft aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe (s. Untersuchungen von Hans Suess aus den 1950er Jahren; Suess-Effekt⁸⁴).

Über das Scripps-Institut und NOAA werden heute neben der Vielzahl von weiteren Bodenanlagen zur Messung der CO₂-Konzentrationen auch Methan-, Distickstoffmonoxid- oder Ozon-Konzentrationsmessungen betrieben.

Um Aussagen über den Verlauf der CO₂-Konzentration zu machen, wird für die Bestimmung der CO₂-Konzentration vor den ersten globalen Messungen auf Lufteinschlüsse in Eisbohrkernen zurückgegriffen. Das wird als sehr sichere Methode betrachtet, da man seit den 1950er Jahren weiß,

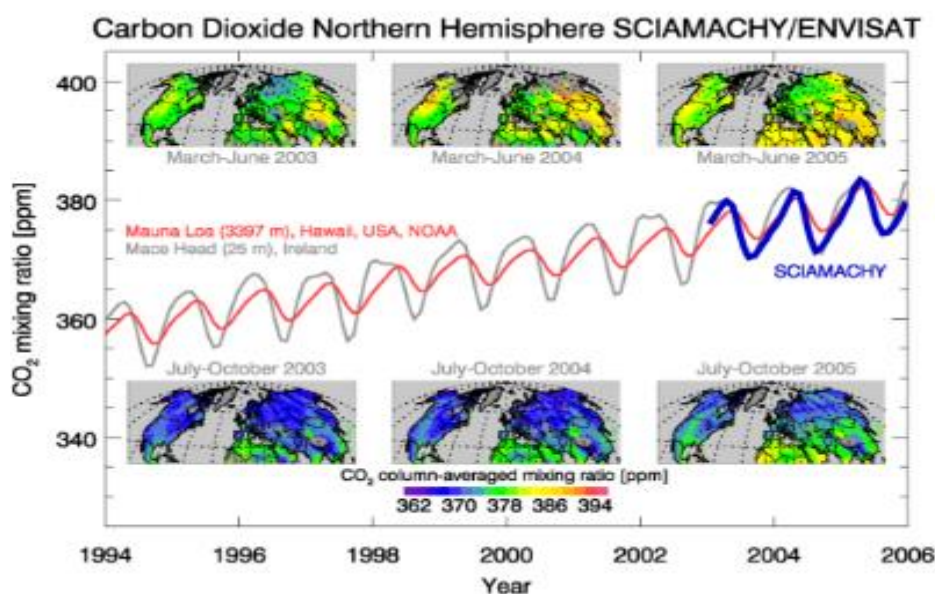
83 Vgl. NOAA; ESRL (2008, 2016). How we measure background CO₂ levels on Mauna Loa. Colorado: https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/about/co2_measurements.html; <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/towers/>

84 „Aus dem Auftreten des Isotops ¹⁴C im CO₂ kann auf die Herkunft des CO₂ geschlossen werden. Wegen des Zerfalls von ¹⁴C findet sich dieses nicht mehr in fossilen Energieträgern (wie Kohle, Öl und Gas) und damit auch nicht im CO₂ aus deren Verbrennung.“ DWD (o. J.). Klimagase (CO₂, CH₄, N₂O): http://www.dwd.de/DE/forschung/atmosphaerenbeob/zusammensetzung_atmosphaere/spurengase/inh_nav/klimagase_node.html

dass die CO₂-Konzentration über der Bodenschicht bis hinauf in die höheren Atmosphärenschichten sehr gleichmäßig verteilt ist und nur die räumlichen, schon beschriebenen jahreszeitlichen Schwankungen aufweist. Danach kann für das 19. Jahrhundert ein sehr glatter Verlauf der CO₂-Zunahme von etwa 280 auf 290 ppm gezeigt werden, während sie im 20. Jahrhundert exponentiell ansteigt und dann nahtlos in die modernen Messungen globaler CO₂-Messstationen übergeht.

Seit 2002 werden CO₂ und Methan in der Atmosphäre zudem auch über Satellitenmessungen genau erfasst (mittels des Instruments SCIAMACHY auf dem von der Europäischen Raumfahrtorganisation ESA betriebenen Umweltsatelliten Envisat, an den sich seit 2009 dann auch die Satellitenmessung über den japanischen Satelliten GOSAT anschloss). Dabei wird die von der Atmosphäre zurückgestreute Sonnenstrahlung analysiert und aus den charakteristischen Spektrallinien der atmosphärischen Bestandteile die Konzentrationen der Spurengase wie auch CO₂ bestimmt. Die sich dabei ergebenden Daten entsprechen im Verlauf denen aus den Bodenstationen. (S. Abbildung)

Über die Satellitenmessungen kann heute seit wenigen Jahren zusätzlich auch die regionale Verteilung von Treibhausgaskonzentrationen auch aus dem All nicht nur erfasst, sondern auch berechnet und computergestützt aufbereitet werden.⁸⁵ (S. Halbkugeln der Abbildung.)



Vergleich der Verläufe und Werte der erhobenen CO₂-Messungen über Satellit (ab 2003) und, übereinstimmend im Verlauf, aus Bodenstationen auf Hawaii und Irland; sowie Darstellung des zunehmenden (und dabei regional zuordenbaren) CO₂-Konzentrationsanstiegs von 2003-2005 mit jeweils saisonalem An- und Abstieg in der Nordhemisphäre; nach Daten der IUP Universität Bremen/DLR/ESA⁸⁶

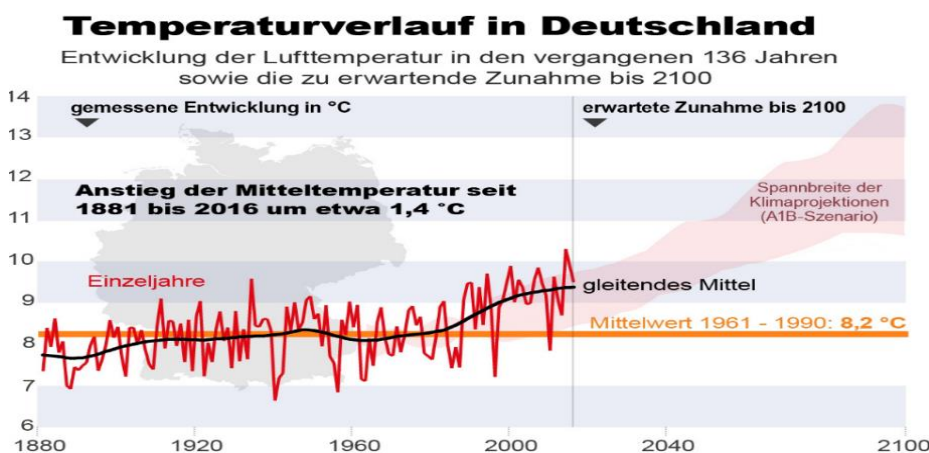
85 Vgl. DLR (2013). Am Puls des Klimawandels. Mitteilung vom 5.9.2013: http://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10080/150_read-8055/year-2013/150_page-4/#/gallery/12184; hier ebenfalls abrufbar : die animierte Darstellung der über zehn Jahre gemessenen CO₂-Konzentration bis 2013 für den gesamten Globus (nach IUP Bremen).

86 IUP Universität Bremen (2013). Image gallery: SCIAMACHY Carbon Dioxide: http://www.iup.uni-bremen.de/sciamachy/NIR_NADIR_WFM_DOAS/wfmd_image_gallery_co2.html vgl. dazu auch die IUP Carbon-Group Website (CO₂, CH₄ und CO observations): http://www.iup.uni-bremen.de/sciamachy/NIR_NADIR_WFM_DOAS/ sowie neuere Grafiken von der ESA: <http://www.esa-ghg-cci.org/>

4.2. Klimaänderungen in Deutschland⁸⁷

Seit 1881 bis 2016 ist es in Deutschland im Mittel **um 1,4°C wärmer** geworden⁸⁸. Damit liegt der Temperaturanstieg über dem Durchschnittswert des Anstiegs der globalen Mitteltemperatur.

Auch die **Niederschläge** haben von 1881 bis 2014 um 10,2% zugenommen, verglichen mit dem langjährigen Mittel von 1961 bis 1990. Im Winter stieg die Niederschlagsmenge um 26% – mehr im Westen Deutschlands als im Osten. Im Sommer gab es 0,6% weniger Niederschläge. (19, 22).



Anstieg der Jahresmitteltemperatur in Deutschland; DWD, 14.3.2017⁸⁹

Auch die **Zunahme der Hitzeereignisse** wird für Deutschland als eindeutig statistisch signifikant und markant beschrieben: die **Anzahl heißer Tage** (Tagesmaximum der Lufttemperatur ≥ 30 °C) ist, über ganz Deutschland gemittelt seit den 1950er-Jahren, von etwa drei Tagen im Jahr auf derzeit durchschnittlich neun Tage im Jahr angestiegen. Die mittlere Anzahl der Eistage (Tagesmaximum der Lufttemperatur < 0 °C) hat im gleichen Zeitraum von 28 Tagen auf 19 Tage abgenommen. Ebenso hat die **Häufigkeit und Intensität von Hitzewellen** in Deutschland zugenommen⁹⁰; einhergehend mit erhöhter Krankheitslast und erhöhten Sterberaten (138). 14-tägige Hitzeperioden mit einem mittleren Tagesmaximum der Lufttemperatur von mindestens 30 °C traten zum

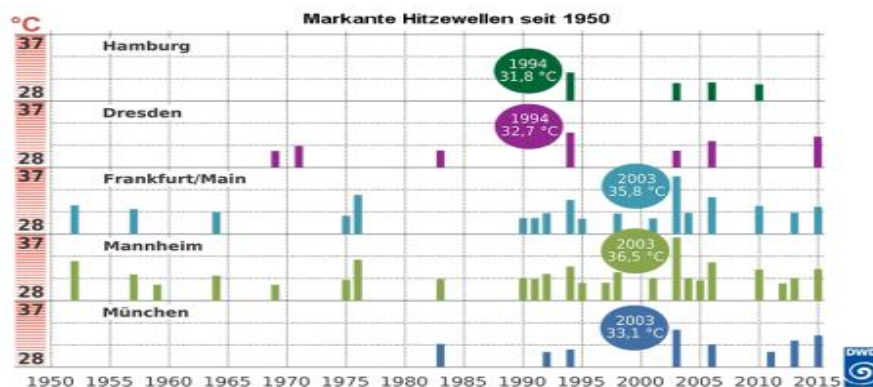
87 Die folgenden Ausführungen beziehen sich vorrangig auf G20Climate (2017): 10-12. Diese nutzen als wesentliche Quellen: Brasseur, Jacob; Schuck-Zöller (Hrsg.) (2017). Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Hamburg - sowie Daten des Instituts für Wetter- und Klimakommunikation (2012) und des Deutschen Wetterdienstes als auch des Fünften IPCC-Sachstandsberichts 2013/2014. Die Angaben werden hier im Kapitel wesentlich um Quellen aus **Brasseur u.a. 2017 (jeweils als Seitenzahl in Klammern innerhalb des Textes angegeben)** ergänzt.

88 Brasseur u.a. 2017 nennen von 1881 bis 2014 einen Anstieg der mittleren Temperaturen im Jahresdurchschnitt um +1,3 °C mit Unterschieden im Sommer (+1,2 °C) und Winter (+1,1 °C). (24). Vgl. zu dem Messverfahren der Bestimmung der einzelnen Klimakenngrößen in Deutschland Brasseur u.a. 2017: 19ff.

89 DWD (2017). Klima-Presskonferenz des Deutschen Wetterdienstes vom 14.3.2017: http://www.dwd.de/DE/presse/pressekonferenzen/DE/2017/PK_14_03_2017/pressekonferenz.html

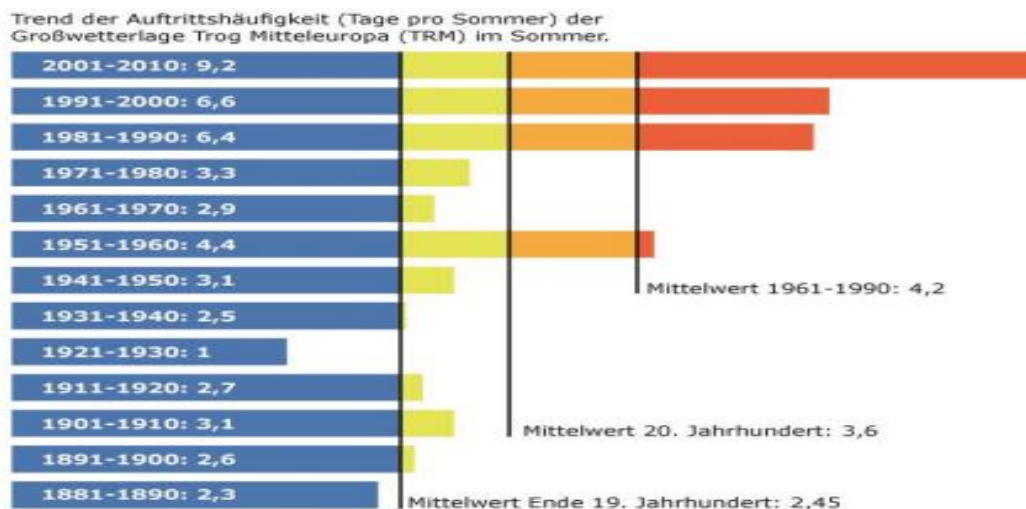
90 Für Europa wird seit 1880 von einer Verdreifachung der Andauer der sommerlichen Hitzewellen ausgegangen (55).

Beispiel in einzelnen Großstädten vor Anfang der neunziger Jahre kaum auf, während sie nun vermehrt in Erscheinung traten.



DWD 2016 nach G20Climate 2017

Auch **kritische Wetterlagen** werden bereits als häufiger auftretend beschrieben, wobei der eindeutige Nachweis auf Grund des seltenen Auftretens solcher Phänomene als schwierig gilt. Der DWD geht jedoch von einer markanten Zunahme der Großwetterlage (GWL) „Trog Mitteleuropa“ (TRM) im Sommer aus, die in bestimmten Gebieten Mitteleuropas häufig für ergiebige **Niederschläge** und dem damit verbundenen **erhöhten Hochwassergefahrenpotential** verantwortlich ist. So habe sich die Zahl der Tage mit Großwetterlagen mit hohem Hochwassergefahrenpotential (GWL Trog Mitteleuropa- TRM) seit Ende des 19. Jahrhunderts in Deutschland im Mittel deutlich erhöht. In den letzten 30 Jahren lag die Zahl der Ereignisse um das zwei- bis dreifache über den Werten zu Beginn des letzten Jahrhunderts.⁹¹



Institut für Wetter und Klimakommunikation nach G20Climate 2017

Quelle: Umweltamt Sachsen, Grafik: (c) Institut für Wetter- und Klimakommunikation

Auch insgesamt können Änderungen bezüglich der Häufigkeit und Intensität von **Starkniederschlägen** festgestellt werden, mit allerdings erheblichen regionalen und saisonalen Variationen

91 Auch die Risiken durch schwere Gewitter würden in Deutschland ansteigen; seit 1980 würde der Trend (auch bereinigt) laut Versicherern bei den entsprechenden Schadenssummen deutlich nach oben gehen.

(mit einer statistisch signifikanten Zunahme vor allem im Winter und eher im Nordwesten und Süden Deutschlands bzw. den Mittelgebirgen). (58, 60). Auf Grund der Analyse von Klimaproxyen geht man davon aus, dass es eine leichte Zunahme des Hagelpotenzials gibt. Schneedeckendauer und Schneedeckenzeit haben vor allem in tieferen Lagen erheblich abgenommen. (64).

An den **deutschen Küsten steigt der Meeresspiegel an**. In den vergangenen hundert Jahren betrug seine Zunahme an der Nord- und Ostsee insgesamt 10 bis 20 cm. Der Trend des Anstiegs kann für die deutsche Nordsee mit einem jährlichen Zuwachs von 1,6-1,8 mm angegeben werden (ähnlich den Daten der anderen Nordseeanrainerstaaten für 1900-2011), und entspricht damit ungefähr dem Anstieg des globalen Mittelwerts.⁹² Sowohl in der Nord- als auch der Ostsee spielen die mittleren Meeresspiegeländerungen eine zentrale Rolle für die erhöhten Wasserstände bei Sturmfluten. (78, 83). An größeren Flüssen kann ein Trend zunehmender Hochwasserwerte belegt werden. (99).

Der **beobachtete Biodiversitätsverlust** in Deutschland, für den neben weiteren Faktoren⁹³ auch der Klimawandel verantwortlich ist, wird als Beginn einer durchaus massiven Entwicklung eingestuft, insbesondere da grob geschätzt fast jede zweite Art in irgendeiner Form gefährdet oder zumindest auf dem Rückzug ist (152). In Deutschland gibt es für die Veränderungen im Lebensrhythmus von Pflanzen und Tieren und für die Veränderungen in den Verbreitungsgebieten als Reaktion auf die allgemeine Erwärmung bereits eine Vielzahl an Belegen. Verschiedene Pflanzen, etwa das Affen-Knabenkraut, breiten sich weiter nach Norden aus. Zugvögel kommen früher zurück, bei Fischen wurde eine frühere Laichzeit nachgewiesen. Wechselbeziehungen zwischen Organismen sind beeinflusst: Beispielsweise verschieben sich Blühzeitpunkte von Pflanzen, sodass sie nicht mehr zur Flugzeit der sie bestäubenden Insekten passen. Vorgezogene Blühzeiten (z.B. bei den Apfelbäumen rund 20 Tage früher im Vergleich zu den siebziger Jahren), bei z.T. noch nächtlicher Kälte, bereiten Obstbauern auch heute schon häufiger schwere Frostschäden. (154, 155). Baumarten sind bereits jetzt in ihrer aktuellen Verteilung in Deutschland durch die gegenwärtige Geschwindigkeit der Klimaänderungen in ihrer natürlichen Anpassung sehr gefordert (199).

5. **Folgen des Klimawandels: Forschungserkenntnisse zu Klimaprojektionen, Großrisiken und Auswirkungen**

In jeder Debatte um einen anthropogenen Klimawandel ist es sinnvoll, zunächst die weiteren möglichen und in naher Zukunft zu erwartenden Klimaänderungen, aber auch die grundsätzlichen mit dem Klimawandel verbundenen ‚Großrisiken‘ und ihre entsprechenden möglichen Folgen und Auswirkungen zu thematisieren, um den Kausalzusammenhang der Relevanz der Klimaänderungen herzustellen.

92 Einfluss auf den Wasserstand an der Nordsee haben auch Gezeiten oder wetterinduzierte Luftdruck- und Windstauereinflüsse sowie kurzfristig Fernwellen. Künftig höhere Anstiegsraten, die auch über dem mittleren globalen Anstiegsraten liegen würden, wären hauptsächlich infolge nahezeitlicher Landsenkung zu erwarten.

93 Dazu gehören Landnutzung, Nitratreintrag, biologische Invasion. Der Klimawandel spielt in der direkten Beeinflussung auf Arten und Lebensräume und in der Verschärfung der Lage eine wichtige Rolle

5.1. Künftige erwartete Klimaänderungen (Klimaprojektionen)

Um die möglichen künftigen Klimaänderungen abzuschätzen, arbeiten Klimawissenschaftler mit **Klimamodellen**. Sie basieren auf dem anerkannten gegenwärtigen Kenntnisstand der physikalischen Grundlagen des Klimasystems und betrachten z.B. Klimaeigenschaften wie die großflächige Verteilung der Lufttemperatur, Niederschlag, Strahlung und Winde, Meerestemperaturen, Meeresströmungen, Meereisbedeckung und wesentliche Aspekte der internen Klimavariabilität. Dabei sind die Modelle in der Lage, grundlegende Züge des aktuellen, beobachteten Klimas abzubilden. Der globale Temperaturtrend des vergangenen Jahrhunderts wird von den Modellen in seinen regional verschiedenen und temporären Ausprägungen gut nachgebildet. Auch globale Temperaturprojektionen der letzten Jahrzehnte stimmen ebenfalls im Nachhinein insgesamt mit den anschließenden Beobachtungen in diesem Zeitraum überein⁹⁴. Zum anderen besitzen die Modelle die Fähigkeit, erdgeschichtlich vergangene Klimaänderungen zu reproduzieren. Dabei können sie im Rahmen der statistischen Unsicherheit viele Merkmale historischer Klimazustände reproduzieren. Beide Fähigkeiten von Klimamodellen steigern für Klimawissenschaftler das Vertrauen, dass sie in der Lage sind, auch die grundlegenden physikalischen Prozesse abzubilden, die für die Simulation zukünftiger Klimaänderungen wichtig sind.^{95,96}

Auf dieser Grundlage gehen die **Projektionen des Fünften IPCC-Sachstandsberichts** davon aus, dass ein (unwesentlich) ungebremster Ausstoß von Treibhausgasen unser derzeitiges Klimasystem weiter tiefgreifend verändern würde: Während bei Szenarien mit sehr ambitionierter Klimapolitik die Simulationen höchstens einen **Temperaturanstieg** von bis zu 2,3°C (wahrscheinlich unter 2°C) zeigen, zeigen sie bei annähernd fortgesetztem CO₂-Ausstoß Temperaturanstiege zum Ende des Jahrhunderts bis maximal 5,4°C.

94 Dabei geben die KlimawissenschaftlerInnen stets zu bedenken, dass Klimamodelle langfristige Klimaänderungen in guter Näherung simulieren. Kurzfristige, natürliche, interne Klimaschwankungen, die unter anderem die verlangsamte Temperaturzunahme im letzten Jahrzehnt beeinflusst haben, können durch die Modelle nachgebildet werden, jedoch nicht der jeweilige Zeitpunkt ihres Eintretens. Die simulierten Temperaturen auf kürzeren Zeitskalen von 10 bis 15 Jahren können im Vergleich zum beobachteten Temperaturverlauf zeitweise zu kalt und zeitweise zu warm sein, wobei der langfristige Temperaturverlauf treffend wiedergegeben wird.

95 Vgl. Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2013). Und sie erwärmt sich doch – Was steckt hinter der Debatte um den Klimawandel? Fragen zu den Grundlagen der Klimawissenschaft, die immer wieder gestellt werden. Dessau-Roßlau: 79-81.

96 Der Weltklimarat hat ein differenziertes Spektrum von Emissionsszenarien für Treibhausgase (inklusive der Annahmen zum Strahlungsantrieb) entwickelt. Für den Fünften Sachstandsbericht werden dabei so genannte „Representative Concentration Pathways – RCPs“ dargestellt. Damit wird der Unsicherheit unterschiedlicher Entwicklungsmöglichkeiten der Weltgesellschaft hinsichtlich vieler – dann jeweils unterschiedlich vorgegebener Aspekte (bei Bevölkerungswachstum, Energiequellennutzung usw.) in Projektionen Rechnung getragen. Daher handelt es sich nicht um Klimaprognosen.

Selbst wenn keine Treibhausgase mehr freigesetzt würden, blieben viele der Änderungen im Klimasystem auf Grund der Trägheit des Klimas über Jahrhunderte bestehen⁹⁷. Es wird davon ausgegangen, dass sich alle bisher beobachteten Veränderungen weiter verstärken würden und alle Erdregionen von den erwarteten Veränderungen (stark oder weniger stark) z.B. bei den **Niederschlägen, beim Eis und Schnee, einigen Extremwetterereignissen, dem Meeresspiegelanstieg und der Versauerung der Ozeane** betroffen wären:⁹⁸

Sehr wahrscheinlich wäre, dass es mehr heiße und weniger kalte Temperaturextreme gäbe. Hitzewellen dürften sehr wahrscheinlich häufiger auftreten und länger andauern. Bis zum Ende dieses Jahrhunderts würden Starkniederschläge über den meisten Landgebieten der mittleren Breiten und über den feuchten Tropen sehr wahrscheinlich intensiver und häufiger auftreten. Bei zunehmender Erwärmung würden in vielen trockenen Regionen der mittleren und subtropischen Breiten die mittleren Niederschläge weiter abnehmen. In vielen feuchten Regionen der mittleren Breiten wären dagegen unter wärmeren Bedingungen bis zum Jahr 2100 (Szenario mit den höchsten Treibhausgasemissionen) Niederschlagszunahmen zu erwarten.

Je nach Szenario könnten die Gletscher bis zum Ende des 21. Jahrhunderts 15 bis 55% (niedrigstes Emissionsszenario) oder 35 bis 85% (höchstes Emissionsszenario) ihres derzeitigen Volumens verlieren. Es ist „sehr wahrscheinlich“, dass das arktische Meereis weiter zurückgeht. Unter dem Szenario mit den höchsten Emissionen könnte die Arktis sogar schon vor Mitte des 21. Jahrhunderts im September eisfrei sein. In der Nordhemisphäre geht die Schneebedeckung zurück. Es ist „praktisch sicher“, dass sich Gegenden mit oberflächennahem Permafrost in höhere nördliche Breiten verlagern werden.

In allen Szenarien würde sich die **Erwärmung der Ozeane** über Jahrhunderte fortsetzen, selbst wenn die Treibhausgasemissionen konstant blieben oder gesenkt würden. Die Erwärmung würde von der Wasseroberfläche in den tiefen Ozean vordringen und die ozeanische Zirkulation beeinflussen. Dabei würden die Ozeane auch weiterhin CO₂ aus der Atmosphäre aufnehmen, was eine weiter zunehmende Versauerung des Meerwassers bewirkte und die Lebenswelt in den Ozeanen stark beeinträchtigte.

Bis Ende des 21. Jahrhunderts sind **Anstiege des globalen Meeresspiegels** um weitere 26 bis 55cm zu erwarten, auch wenn beträchtliche Klimaschutzanstrengungen unternommen würden (niedrigstes Emissionsszenario). Ohne Emissionsbeschränkungen würde der Meeresspiegel bis

97 So zeigen Klimamodelle, dass die Stabilisierung der CO₂-Konzentrationen 100-300 Jahre dauern würde, dass die oberflächennahe Lufttemperatur noch über mindestens ein Jahrhundert, wenn nicht einige Jahrhunderte ansteige und dass der Meeresspiegel noch über mindestens mehrere Jahrhunderte infolge der thermischen Ausdehnung und in Folge des abschmelzenden Eises wahrscheinlich noch bis zu Jahrtausenden ansteigen dürfte. Vgl. WOR (2010, 2015). Klimasystem der Erde. Die schleichende Katastrophe: <http://worldoceanreview.com/wor-1/klimasystem/klimasystem-der-erde/2/>

98 S. zu der folgenden Zusammenfassung der künftig erwarteten Klimaänderungen: „Kernbotschaften des Syntheserberichtes des Fünften Sachstandsberichts des IPCC. Klimaänderung 2013: Naturwissenschaftliche Grundlagen (Teilbericht 1)“, (aktual. 2016), übersetzt und zusammengestellt durch BMUB, BMBF, UBA und der IPCC-Koordinierungsstelle: http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/ipcc_sachstandsbericht_5_teil_1_bf.pdf

Ende des Jahrhunderts im Mittel zwischen 45-82 cm ansteigen (höchstes Emissionsszenario); dabei schließen die vom IPCC ausgewerteten Arbeiten und auch der IPCC in seiner Einordnung selbst nicht aus, dass der Anstieg des Meeresspiegels auch deutlich höher ausfallen könnte. Bei zunehmender Erwärmung würde der „Golfstrom“ eher schwächer; abrupte Änderungen oder ein Zusammenbruch im Verlauf des 21. Jahrhunderts werden als „sehr unwahrscheinlich“ erachtet, könnten jedoch bei fortgesetzter starker Erwärmung nach dem 21. Jahrhundert nicht ausgeschlossen werden.

Viele Forscher weisen aktuell jedoch darauf hin, dass vor allem die Projektionen bezüglich des Meeresspiegelanstiegs aus dem letzten IPCC-Sachstandsbericht überholt sein dürften, da das (schon gegenwärtige) Schmelzen der Eisschilde nicht hinreichend berücksichtigt worden sei, weshalb auch langfristig stark höhere Meeresspiegel möglich sein dürften⁹⁹. (S. auch Kapitel 5.3).

Exkurs: Erwartete Klimaänderungen für Deutschland

Künftig werden für Deutschland vor allem die Zunahme von häufigeren Extremwettern erwartet: mehr (regional abhängige) winterliche Starkniederschläge (64)¹⁰⁰, mehr Hitzeereignisse – insbesondere für Süddeutschland (55). Durch mehr Wasserdampf in der Atmosphäre wird auch das Potenzial für schwere Gewitter und Hagel wahrscheinlich weiter ansteigen (64). Und deutsche Wissenschaftler nannten in den Medien im Sommer 2017 auch häufig ein erhöhtes künftig anzunehmendes Risiko für Hochwasser und Sturmfluten. (S. zu den Erwartungen für die Küsten Kapitel 5.3).

5.2. Risiken des Klimawandels: schwere Klimafolgen

Grundsätzlich werden über die Klimaprojektionen hinaus in den Klimawissenschaften auch übergeordnet Klimarisiken formuliert, die groß-skalige Eingriffe in das Erdsystem darstellen; dies soll ein Verstehen der möglichen Eingriffstiefe des sich vollziehenden Klimawandels ermöglichen.

5.2.1. „Burning embers“

Für die mit steigendem mittleren globalem Temperaturzuwachs zunehmenden, grundsätzlich verbundenen Klimarisiken werden seit dem Dritten IPCC-Sachstandsbericht fünf so genannte „begründete Klimasorgen“ („risks for concern“) beschrieben. Das sind:

- das Risiko für einzigartige und bedrohte Systeme: wenn mehr Korallenriffe, Tier- und Pflanzenarten, seltene und besonders artenreiche Lebensräume, Inselstaaten, tropische Gletscher oder indigene Bevölkerungsgruppen erheblichen Schaden nehmen oder unumkehrbar zerstört werden und die Anpassungsfähigkeit begrenzt ist.

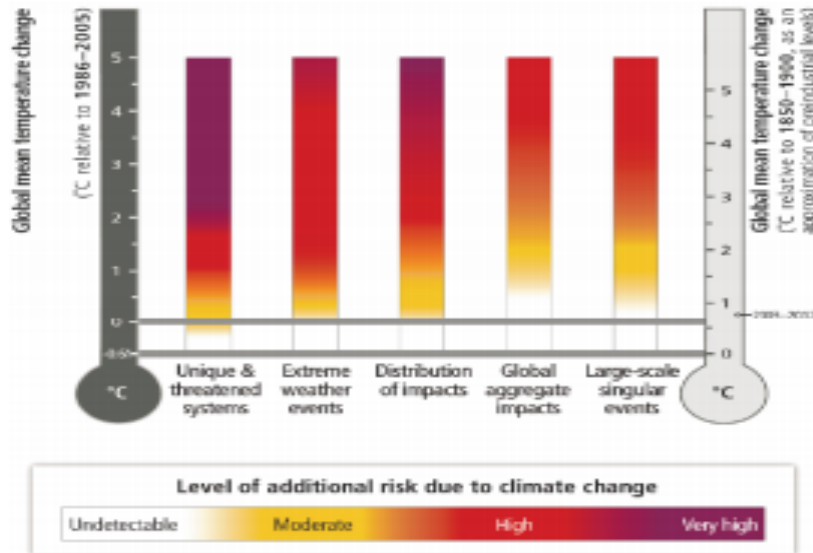
99 Vgl. dazu z.B. European Environment Agency (2016): Global and European sea level: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/sea-level-rise-4/assessment-2>

100 Die in Klammern angegebenen Seitenangaben dieses Exkurses beziehen sich als Belege auf Brasseur u.a. 2017.

- das Risiko extremer Wetterereignisse: wenn Häufigkeit, Stärke und Folgeschäden von extremen Wetterereignissen wie Hitzewellen, Überschwemmungen, Dürren oder tropischen Wirbelstürmen zunehmen.
- das Risiko der Verteilung der Auswirkungen: wenn mehr Regionen, Länder und Bevölkerungsgruppen schwer von Klimafolgen betroffen sind (auch insgesamt mit Auswirkungen für globale und regionale Ernährungssicherheit).
- das Risiko bei aggregierten Schäden: wenn die erwarteten (finanziellen) Schäden (z.B. bei Artenverlust und Wirtschaftsschäden; positive und negative Folgen zusammengefasst) steigen. Und
- das Risiko für grundlegende Veränderungen im Erdsystem: wenn das Risiko steigt und mehr wichtige Prozesse im Gesamtklimagefüge „kippen“ und von da an grundsätzlich anders verlaufen (wie beim Abschmelzen des Grönländischen Eisschildes, einer großflächigen Versteppung des Amazonas-Regenwaldes oder der Schwächung des Nordatlantikstromes).¹⁰¹

Grafisch wird die Risikozunahme bei steigendem Temperaturzuwachs (im Vergleich zum vorindustriellen Niveau) in einem sich rot verstärkendem Säulendiagramm - bekannt als „Burning embers“-Diagramm – für die einzelnen Risikokategorien dargestellt. Dabei nimmt das Risiko schwerer Klimafolgen (weiß= nicht nachweisbar, gelb = moderat, rot= hoch, lila= sehr hoch) deutlich zu, wenn die globale Durchschnittstemperatur nur geringfügig weiter ansteigt. Gegenüber der ersten Darstellung im Dritten IPCC-Sachstandsbericht ist das Risiko im Fünften Sachstandsbericht für einzelne Risikokategorien nach Auswertung des Stands der Forschung noch früher anzusetzen als zuvor vermutet wurde: Viele Ökosysteme reagieren demnach noch früher empfindlich auf die globale Erwärmung und den CO₂-Anstieg, extreme Wetterereignisse wie Dürreperioden, Hitzewellen oder tropische Wirbelstürme treten danach vermehrt bei noch niedrigeren Temperaturzuwachsen an und auch bei das hohe Risiko grundlegender Veränderungen im Erdsystem scheint aus wissenschaftlicher Sicht deutlich unter die 3-Grad-Grenze gerückt zu sein.

101 Vgl. dazu u.a. PIK (2009). Risiken der globalen Erwärmung müssen höher eingeschätzt werden: <https://www.pik-potsdam.de/aktuelles/pressemitteilungen/archiv/2009/sperrfrist-montag-23-uhr-risiken-der-globalen-erwaermung-muessen-hoehereingeschaetzt-werden>



Gefahrenpotenzial für fünf übergreifenden Risikokategorien in Abhängigkeit von der Temperaturzunahme (Skala rechts: Temperaturzuwachs gegenüber vorindustriellem Niveau). IPCC (2014), AG II¹⁰²

Insgesamt steigen jenseits einer Erwärmung über 2°C die Folgen für alle Kategorien in den Bereich des hohen Risikos (rot). Damit steigt zusammengenommen spätestens oberhalb der 2°-C-Grenze die Wahrscheinlichkeit für ernsthafte, allgegenwärtige und irreversible Klimafolgen deutlich an.¹⁰³

5.2.2. „Kippelemente“

Das Konzept der Kippelemente („tipping elements“) zur Beschreibung großer Risiken von Klimafolgen bezieht sich auf kritische Grenzen für überregionale Bestandteile des Klimasystems, bei denen diese Bestandteile des Klimasystems „kippen“ und von diesem Zeitpunkt in ihrer bisherigen Funktionsweise grundsätzlich gestört sind.

Dabei weisen diese Teilsysteme ein Schwellenverhalten in Bezug auf das Hintergrundklima¹⁰⁴, auf. Sie „kippen“ an bestimmten Punkten („tipping points“), z.B. der Temperaturentwicklung. Dem Schwellenverhalten liegen oft selbstverstärkende Prozesse zugrunde, die – einmal angestoßen – auch ohne weiteren externen Einfluss weiterlaufen. Dadurch kann es passieren, dass der

102 IPCC (2014). Summary for Policymakers. Working Group II: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Cambridge New York: 12: http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/ar5_wgII_spm_en.pdf

103 Einzelne IPCC-Autoren haben mit Kollegen 2017 auf dieser Grundlage in dem Fachmagazin Nature Climate Research ein grafisch detailliertes Säulendiagramm der „Burning embers“ veröffentlicht – mit auch textlicher Beschreibung einer gegenwärtigen Literaturschau zu den fünf Risikokategorien. O’Neil, Brian C. u.a (2017). IPCC reasons for concern regarding climate change risks. In: Nature Climate Change. Review article. Online veröffentlicht am 4. Januar 2017, Vol. 7 (28-37): <https://www.princeton.edu/system/files/research/documents/nclimate3179.pdf>; http://www.nature.com/nclimate/journal/v7/n1/fig_tab/nclimate3179_F1.html

104 Da Hintergrundklima wird z.B. durch Meeresströmungen und langfristig auch von tektonischen Bewegungen hergestellt/beeinflusst (s. dazu „Randbedingungen“ im Kapitel 6.1)

neue Zustand eines Kippelementes erhalten bleibt, also irreversibel ist, selbst wenn das Hintergrundklima wieder hinter den Schwellenwert zurückfällt. Der Übergang nach dem Überschreiten eines systemspezifischen Kippunktes kann dabei sprunghaft, aber auch kriechend erfolgen. Seine Umweltauswirkungen sind weitreichend und könnten auf die Lebensgrundlagen vieler Millionen Menschen gefährdend wirken. Wenn ein solches Kipp-Element „umgekippt“ ist, ist es sehr wahrscheinlich, dass dadurch ein anderes wichtiges Element des Klimasystems negativ beeinflusst wird, da das Klimasystem auf der Erde durch viele sich gegenseitig beeinflussende Prozesse gekennzeichnet ist (z.B. steuert das Eis an den Polen auch das Wetter weltweit).

Einige Kippelemente können zudem einen sich selbst beschleunigenden Klimawandel in Gang setzen.

Bisher wurden zu den Kippelementen mit besonderer Relevanz folgende gezählt:

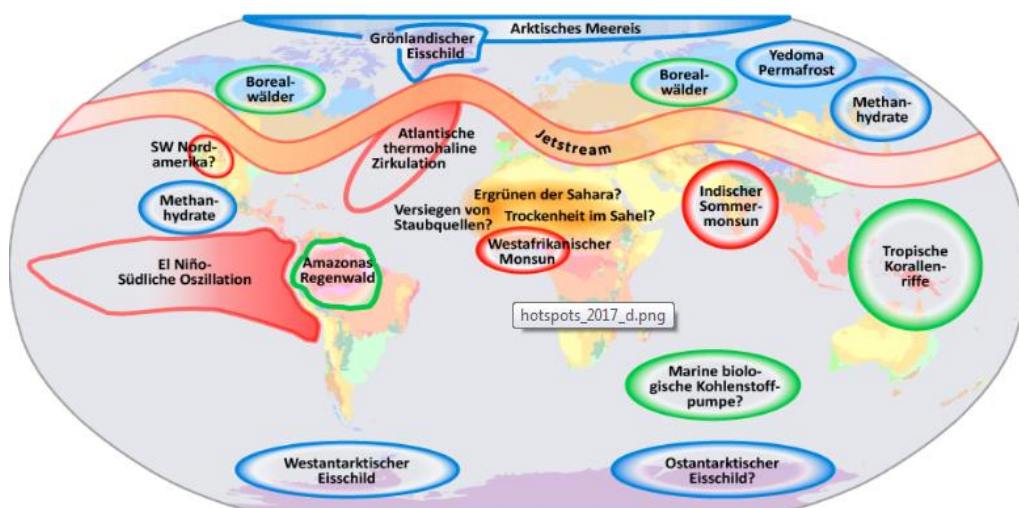
- das Arktische Meereis (mit der Gefahr des Schmelzens),
- der Grönländische Eisschild (mit der Gefahr des Verlustes),
- das Westantarktische Eisschild (mit der Gefahr des Kollapses),
- die Borealen (Nadel-) Wälder (mit der Gefahr des Rückgangs),
- der Amazonas-Regenwald (mit der Gefahr seiner Umwandlung in einen saisonalen Wald oder Graslandschaft über den Rückgang der Niederschläge in einem wärmeren Erdklima und die Abholzung des Regenwaldes sowie Brände mit grundlegenden Auswirkungen auf das Erdklima durch den Verlust als bedeutende Kohlenstoffsенке),
- der El Niño und die Südliche Oszillation (ENSO) (mit der Gefahr seiner Störung),
- der Sahara-/Sahel- und der Westafrikanische Monsun (mit der Gefahr seiner Verlagerung mit Auswirkungen auf die Sahara),
- der Indische Sommermonsun (mit der Gefahr seiner Destabilisierung, da von ihm bisher 90% des indischen Regens abhängen, mit der Gefahr der Ausbildung einer Pendelbewegung von abgeschwächten und verstärkten Monsunereignissen in Südasien, in deren Folge sich extreme Dürren und Flutkatastrophen abwechseln könnten),
- die Thermohaline Atlantikzirkulation (mit der Gefahr ihrer Abschwächung)

Wo genau die „tipping points“ für bestimmte Kippelemente liegen, kann man nicht auf einen exakten Temperaturzuwachs bezogen bestimmen, ihn aber ungefähr angeben: Beispielsweise liegt bei „mittlerem Vertrauen“ das Risiko des „Kippens“ für das arktische System und die Korallenriffe bei einer Temperaturabweichung von 0,7°C - 1,7°C gegenüber vorindustriellem Niveau, für das grönländische und antarktische Eisschild liegt der Risikobereich für das mögliche „Kippen“ zwischen 1,7°C - 4°C.¹⁰⁵

Das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung hat 2017 zudem eine Übersicht der Gesamtheit der diskutierten Kippelemente veröffentlicht, die in drei Klassen (Eiskörperverlust mit Eis-Albedo-Rückkopplungsverstärkungseffekt, Veränderungen der Strömungssysteme, bedrohte Ökosysteme von überregionaler Bedeutung) unterschieden werden können, und folgende weitere Kippelemente benannt:

105 Vgl. O’Neil, Brian C. u.a (2017): 30.

- der Teilkollaps in der Ostantarktis,
- das Auftauen der Yedoma-Dauerfrostböden, bei dem in Sibirien und Nordamerika über Jahrhunderte riesige Mengen an Kohlenstoffdioxid und Methan freigesetzt würden,
- die Methan-Ausgasung aus den Ozeanen des in Meereis eingeschlossenes arktischen ostsibirischen Methans,
- die Verlangsamung oder das Einrasten der planetarischen Wellen des Jet Streams,
- das Austrocknen des nordamerikanischen Südwestens,
- die Zerstörung von Korallenriffen (wobei der Wiederaufbau eines Riffs mehrere tausend Jahre braucht),
- die Abschwächung der marinen biologischen Kohlenstoffpumpe, bei der die Aufnahme-funktion der Weltmeere von riesigen Mengen Kohlenstoff aus der Atmosphäre durch Erwärmung und Versauerung des Wassers sowie häufiger auftretende Sauerstoffarmut eingeschränkt werden würde.



Geografische Einordnung der wichtigsten Kippelemente im Erdsystem; Fragezeichen kennzeichnen Systeme, deren Status als Kippelement wissenschaftlich noch nicht gesichert ist; PIK 2017¹⁰⁶

5.3. Beispiel: Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs

Beispielhaft für die Eingriffstiefe und die Breite der Effekte einzelner Klimaänderungen sollen im Folgenden einige der Auswirkungen für den Anstieg des Meeresspiegels betrachtet werden.

Dass der Anstieg des globalen Meeresspiegels von der Wissenschaft ohne Zweifel als **eine der wichtigsten Folgen des anthropogenen Klimawandels** beurteilt wird, hängt damit zusammen, dass weltweit etwa 2 Millionen km² Land weniger als 2 m über der mittleren Hochwasserlinie liegen. Dabei ist diese Grenzzone des nahen Küstenbereichs zwischen Land und Meer durch besonders artenreiche Ökosysteme gekennzeichnet und auch der Mensch hat sich bevorzugt in diesen Gebieten nahe oder direkt an der Küste angesiedelt.

106 Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) (2017). Kippelemente – Achillesfersen im Erdsystem: <https://www.pik-potsdam.de/services/infothek/kippelemente>

Laut Schätzungen des IPCC bedroht der Meeresspiegelanstieg bis zum Jahr 2100 die Siedlungsräume von hunderten Millionen von Menschen, dabei am stärksten betroffen sind Ost-, Südost- und Südasien. In Ländern mit hoher Bevölkerungsanzahl wie China leben 10% der Bevölkerung in niedrig gelegenen Küstenregionen, in Bangladesch 39%, in Vietnam 53%, in Japan 24%, in Ägypten 36%, in den USA 8%, in Thailand 25% und auf den Philippinen 20%.¹⁰⁷ „Grob geschätzt leben weltweit mehr als 200 Millionen Küstenbewohner unterhalb von 5 Metern (über Normalnull). Diese Zahl wird bis zum Ende des 21. Jahrhunderts auf schätzungsweise 400 bis 500 Millionen ansteigen. Unterhalb von 20 Metern leben heute weltweit sogar eine Milliarde Menschen.“¹⁰⁸ Bis zum Ende des Jahrhunderts werden die Millionenstädte an den Küsten weiterwachsen und neue Städte vor allem in Asien hinzukommen. Schon bisher liegen **acht der zehn größten Städte der Welt in niedrigen Küstenbereichen**.¹⁰⁹

Damit kann der Meeresspiegelanstieg zu einem **direkt den Wohn- und Lebensraum von Millionen Menschen betreffen**; Bauten und Infrastrukturen (Straßen, Brücken, öffentliche Verkehrsmittel, Kraftwerke, Deponien usw.) im Wert von Billionen US-Dollar wären unmittelbar durch den Anstieg des Meeresspiegels bedroht¹¹⁰ und langfristig könnten weite Küstenstreifen (ohne Gegenmaßnahmen) unter dem Meeresspiegel oder in mehreren Jahrhunderten auch Orte, an denen heute noch Megastädte sind, im Meer liegen.¹¹¹

Zum anderen stellt aber nicht nur der bloße Anstieg des Meeresspiegels für die tiefer liegenden Küstenzonen eine Gefahr dar. Wichtig sind auch die **weiteren mit dem Anstieg unmittelbar verbundenen Folgen**. Dazu gehören die Erosion von Küstengebieten, ein höheres Auflaufen und Ein-

107 Zu den Ländern, deren Bevölkerung zu hohen Anteilen in niedrig gelegenen Küstenregionen lebt, die aber nicht zu den bevölkerungsreichsten gehören, zählen u.a. die Malediven (100% der Bevölkerung), Bahrain (78%) oder die Niederlande (60%). Vgl. World Ocean Review (in Zusammenarbeit mit der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel und dem Exzellenzcluster „Ozean der Zukunft“, Leitung von Prof. Martin Visbeck;) (WOR Bericht 1 2010; andere Berichte bis 2015). Lebensraum Küste: <http://worldoceanreview.com/wor-1/kuesten/lebensraum-kueste/2/>

108 Vgl. WOR (2010, 2015). Lebensraum Küste.

109 Vgl. G20Climate (2017). Folgen für Küstenmetropolen in G20-Staaten. Zusammenstellung vom 5.7.2017 (14-18): http://www.deutsches-klima-konsortium.de/fileadmin/user_upload/pdfs/Veranstaltungen/Climate20/DE/Climate20_Presseinformation.pdf; tief liegende Inselarchipele wie die Malediven oder die Bahamas-Inselgruppen sind auch schon in näherer Zukunft vor dem Überspült-Werden bedroht.

110 Z.B. könnte sich die Anzahl der Menschen, die infolge des Meeresspiegelanstiegs (und weiteren Faktoren wie dem Städtewachstum) dem Risiko ausgesetzt sind, mindestens einmal in hundert Jahren von einer Flut betroffen zu sein, von Anfang des Jahrhunderts mit 40 Millionen Menschen bis 2070 mehr als verdreifachen. Auch die Summe der Werte, die Flutrisiken ausgesetzt wären, würde deutlich steigen: bei einem Meeresspiegelanstieg von 50 cm bis 2070 wären Werte in Höhe von 9% des dann errechneten globalen BIP von der erhöhten Gefährdungslage betroffen, während es Anfang dieses Jahrhunderts noch 5% sind. Vgl. Hanson, Susan (2011). A global ranking of port cities with high exposure to climate extremes. In: Climatic Change, 104 (1) (89-111): http://eprints.lse.ac.uk/39981/1/_lse.ac.uk_storage_LIBRARY_Secondary_library_shared_repository_Content_Ranger.%20Global%20ranking_Ranger_Global%20ranking_2014.pdf

111 Vgl. G20Climate (2017).

laufen ins Inland von (Sturm)fluten– von denen viele der wirtschaftsstarken und bevölkerungsreichen G20-Regionen schon heute betroffen sind¹¹² – , ein Aufweichen von Deichen, häufigere Überschwemmungen, die Versalzung des für den öffentlichen und landwirtschaftlichen Gebrauch benötigten Grundwassers durch das Eindringen von Meerwasser oder Stress für die küstennahen Ökosysteme. Die Gefährdung hängt dabei nicht zuletzt von den Küstenformen ab. Steile Felsküsten sind durch Erosion weniger gefährdet als Sandküsten oder Deltas, die aber wiederum bevorzugte Siedlungsgebiete sind.

Entscheidend für die jeweilige regionale Bedeutung eines mittleren globalen Meeresspiegelanstiegs sind insgesamt die **relativen Meeresspiegeländerungen**, die das Verhältnis des Meeresspiegels zum jeweils angrenzenden Land bestimmen. So sind und werden Regionen, die Landsenkungen erleben, stärker betroffen (sein) als Regionen, in denen es Landanhebungen gibt (z.B. in der nördlichen Ostsee durch nacheiszeitliche Ausdehnung). In Manila ist der Meeresspiegelanstieg auch schon heute durch die Absenkung der Landoberfläche, bedingt durch eine starke Grundwasserentnahme, relativ stark. Neben Grundwasserentnahmen können dabei auch Gebäude und Infrastrukturanlagen zu Bodenabsenkungen führen. Oder es kann zu einer Verringerung der Sedimentablagerung ins Delta kommen, weil ein Stausee flussaufwärts die Sedimente zurückhält. Bedroht von Absenkungen sind vor allem die großen, bevölkerungsreichen Deltas in Süd-, Südwest- und Ostasien, aber auch in Afrika. Einige der asiatischen Megastädte liegen in gefährdeten Gebieten und haben schon heute mit erheblichen Bodenabsenkungen zu tun. So haben sich im Laufe des 20. Jahrhunderts einzelne Teile der Küste in Tokio um 5 m, in Shanghai um 3 m und in Bangkok um 2 m abgesenkt. Der Meeresspiegelanstieg durch den Klimawandel wird dort dann verstärkt zum Tragen kommen.¹¹³

Bei der **Höhe des zukünftigen Meeresspiegelanstiegs** geht die im IPCC-Bericht 2013 dargestellte Forschung auf der Grundlage prozessbasierter Mollrechnungen davon aus, dass der Anstieg bis 2100 bei fortgesetzter Treibhausgasemission unter 1 m bleiben wird. Wie ebenfalls schon erwähnt gehen neuere Studien davon aus, dass das Schmelzen der Eisschilde in den Modellrechnungen nicht ausreichend abgebildet ist (wie es der IPCC auch selbst schon als Möglichkeit formuliert hatte) und gegenwärtige Entwicklungen zum eventuell schon eingetretenen „Kippen“ der Westantarktis und möglicherweise des grönländischen Eisschildes berücksichtigt werden müssten. Viele der Forscher gehen im Moment davon aus, dass der mittlere globale Meeresspiegelanstieg daher bis zum Ende dieses Jahrhunderts zwischen 0,3 m bis höchstens 2 m liegen wird (da

112 Vgl u.a. NOAA; Lindsey, Rebecca (2017), Climate Change: Global Sea Level. Artikel vom 11.9. 2017: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-sea-level>

113 Vgl. Nicholls, R.J.; Cazenave A. (2010). Sea-Level Rise and Its Impact on Coastal Zones. In: Science 328 (1517-1520). Vgl. auch NASA (2016). Big coastal cities sink faster than seas rise. Artikel vom 30. August 2016: <https://sealevel.nasa.gov/news/58/big-coastal-cities-sink-faster-than-seas-rise>

allein die Antarktisentwicklung ggf. 1 m Meeresspiegelanstieg bis 2100 und damit eine Verdoppelung verursachen könnte¹¹⁴.)

Grundsätzlich kann gesagt werden, dass in der kompletten Antarktis ca. 60 Meter Meeresspiegel-Äquivalent („equivalent sea level“) gebunden sind, die Westantarktis hält ca. 3,3 Meter potenziellen Meeresspiegelanstieg. Weitere ca. 7 Meter Meeresspiegel-Äquivalent sind im Eis Grönlands gebunden, das bei einem kompletten Schmelzen des grönländischen Eisschildes dann über Jahrhunderte bis Jahrtausende zum Tragen kommen würde. Damit entsteht ein **potenziell möglicher Meeresspiegelanstieg über vorhandene Eismassen** von gut “230 feet“, also 70 m; die Wärmeausdehnung der Ozeane würde eine untergeordnete Bedeutung haben. Der Meereisverlust der Arktis spielt für den Meeresspiegelanstieg nicht direkt eine Rolle, weil das Meereis ja bereits im Wasser schwimmt, er hat aber über den Albedo-Effekt Effekte verstärkende Effekte auf die Erwärmung, die dann wiederum auch auf die Eismassen wirkt.¹¹⁵ Klimawissenschaftler, wie z.B. Prof. Stefan Rahmstorf oder Prof. Hans Joachim Schellnhuber, haben daher auch schon medial darauf hingewiesen, dass bei weiter steigenden Treibhausgasemissionen und einem folgenden potenziellen Abschmelzen des kompletten grönländischen Eisschildes (dann in 10.000 Jahren) und einem gleichzeitigen Abschmelzen erheblicher Teile der Antarktis potenziell ein Anstieg des jetzigen Meeresspiegels von bis zu 50 m möglich ist.¹¹⁶

Der **Meeresspiegel** hat sich **erdgeschichtlich immer auch wieder sehr stark verändert**. So kann der Meeresspiegel „sich innerhalb von Jahrhunderten im 10-Meter-Bereich verändern und über Jahrmillionen durchaus um mehr als 200 Meter schwanken. Durch die Eiszeiten nahm die Häufigkeit und Intensität dieser Schwankungen während der letzten 3 Millionen Jahre zu: Während

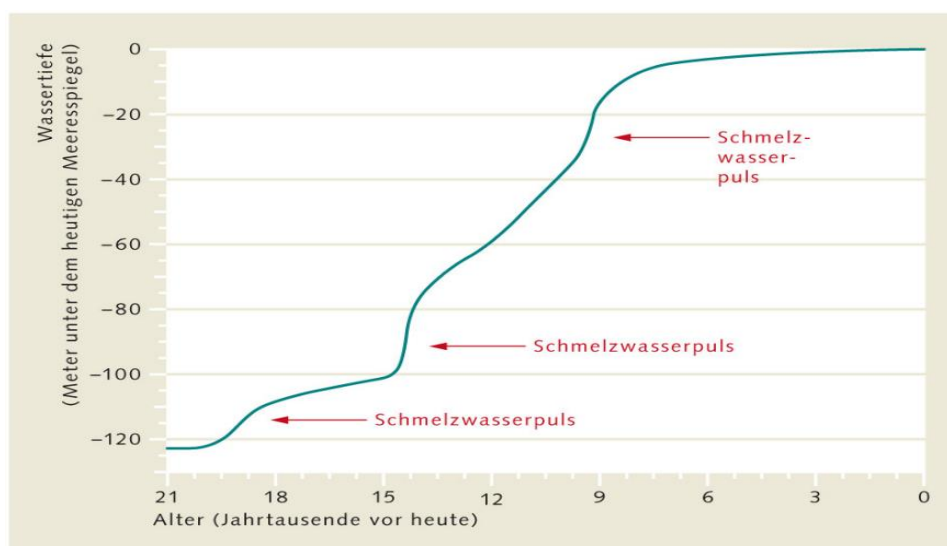
114 Deconto/Pollard gehen bspw. von einem bis zu 2 m-hohen mittleren Anstieg des Meeresspiegels bis 2100 aus, der bis 2500 auf 13 m allein wegen der Antarktis-Entwicklung anwachsen könnte. Vgl. DeConto, Rob; Pollard, David (2016). Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise. In: Nature 531 (591–597): <https://www.nature.com/nature/journal/v531/n7596/full/nature17145.html>; andere Studien (mit unterschiedlichen Annahmen und Fragestellungen) nennen diesbezüglich auch mögliche Meeresspiegelanstiege von bis zu 6-9 m in den kommenden Jahrhunderten oder bis zu 5 m in den kommenden 300 Jahren.

Deconto/Pollard (2016) verweisen zudem auf einen Vergleich zu früheren geologischen Epochen, bei denen (größte Teile) Grönland(s) und der Antarktis abgeschmolzen waren und die in ihren Klimarahmenbedingungen (bei CO₂-Gehalt bzw. Temperaturen) zugleich Bezüge zu unserer gegenwärtigen Entwicklung aufweisen. Dabei sei der Meeresspiegel im Pliozän vor 3 Mio. Jahren 10-30 m und in der letzten Zwischeneiszeit Eem vor ca. 130.000-115.000 Jahren 5-10 m höher gewesen als heute. – Der IPCC bewertete die Literatur dieser genannten Zwischeneiszeit mit der Änderung des Meeresspiegels mit „hohem Vertrauen“, wonach diese im Zusammenhang mit einem Antrieb durch veränderte Erdbahneigenschaften und mit Oberflächentemperaturen in hohen Breiten stand, die gemittelt über mehrere tausend Jahre ca. 2°C wärmer waren als heute.

115 Vgl. Motta, Rob; White, James; Nerem, Steven (2016). Ten things you should know about sea level rise. Colorado University (gehören zu den meist zitierten Fachwissenschaftlern ihrer Gebiete; fassen in dem Artikel den Stand der Forschung zusammen). In: Washington Post vom 20.5.2016: https://www.washingtonpost.com/news/capital-weather-gang/wp/2016/05/20/10-things-you-should-know-about-sea-level-rise-and-how-bad-it-could-be/?utm_term=.6178aa62fd9e

116 Motta u.a. weisen auf den potenziell möglichen Anstieg von bis zu 70 m hin (dann auch über einen Zeitraum mehrerer tausend Jahre), wenn tatsächlich 5°C Erwärmung (wie beim ungebremsten Treibhausgaskonzentrations-IPCC-Szenario projiziert) erreicht würden und damit eventuell alle Eismassen zum langfristigen Schmelzen gebracht würden.

der Kaltzeiten bildeten sich auf dem Festland in höheren Breiten große Eismassen, sodass den Ozeanen Wasser entzogen wurde. Der Meeresspiegel sank global drastisch ab. Während der Warmzeiten schmolzen die kontinentalen Eiskappen ab und der Meeresspiegel stieg wieder stark an. Die letzte Warmzeit, die mit der heutigen Klimaperiode vergleichbar ist, gab es vor 130 000 bis 118 000 Jahren. Damals lag der Meeresspiegel rund vier bis sechs Meter höher als heute. Danach folgte ein unregelmäßiger Übergang in die letzte Kaltzeit – so war die Erde vor 26 000 bis 20 000 Jahren zum letzten Mal maximal vereist. Damals lag der Meeresspiegel 121 bis 125 Meter tiefer als heute. Dann setzte die nächste Warmperiode ein. Der Meeresspiegel stieg dabei relativ gleichmäßig an. Hin und wieder aber gab es Phasen eines beschleunigten Anstiegs, die durch sogenannte Schmelzwasserpulse ausgelöst wurden. Ursache dafür war das Kalben großer Gletschermassen in der Antarktis und in den vereisten Gebieten auf der Nordhalbkugel. In anderen Fällen liefen riesige Stauseen aus, die sich beim Abschmelzen vor den zurückweichenden Inlandgletschern gebildet hatten. Dieser vergleichsweise starke Anstieg des Meeresspiegels dauerte bis vor etwa 6 000 Jahren an.“¹¹⁷



World Ocean Review, s.
Fußnote 117

Seither war der Meeresspiegel **in den letzten tausenden Jahren stabil** und hat sich nur sehr geringfügig mit Schwankungen von wenigen Zentimetern pro Jahrhundert verändert. Hinzukommt, dass der **heutige Anstieg erdgeschichtlich gesehen außergewöhnlich schnell** verläuft. In den Größenordnungen des Anstiegs verlief er zuvor nur über Jahrtausende; es sei denn, Eisschilde kollabierten. In diesen Fällen wurden wahrscheinlich Anstiegsraten von einem Fuß oder mehr, also ca. 0,33 m, pro Dekade erreicht¹¹⁸ (bis zu 5 m pro Jahrhundert in Phasen von Schmelzwasserimpulsen).

Da der Meeresspiegel ein System mit großer Trägheit ist, reagiert er sehr langsam auf die Erderwärmung; umgekehrt ist der **Anstieg** damit jetzt auch **nicht mehr stoppbar**, sondern steigt auch

117 WOR (2010; 2015). Die Gefahr durch Meeresspiegelanstieg: <http://worldoceanreview.com/wor-1/kuesten/gefahrdurch-meeresspiegelanstieg/>

118 Vgl. Motta u.a. 2016.

bei stagnierender Erwärmung weiter für Jahrhunderte an. Ein Erwärmungsstopp würde aber verhindern, dass sich der Meeresspiegelanstieg weiter beschleunigt, denn mit zunehmender Erwärmung könnten die insgesamt trotzdem sehr trägen Eismassen schneller schmelzen, da sich ihre Reaktionszeit nicht proportional zur Erwärmungsrate verhalten muss.

In den **Projektionen für die europäischen Küsten** bis 2100 geht man davon aus (im Fünften IPCC-Sachstandsbericht), dass sich der zukünftige Meeresspiegel wahrscheinlich ähnlich wie der globale Meeresspiegel verändern wird – mit sehr großen regionalen Unterschieden: in Nordschweeden mit einer leichten Absenkung des Meeresspiegels und einem Anstieg von bis zu einem knappen Meter bei Den Helder in den Niederlanden. Als insgesamt gefährdetste Küstengebiete bei einem mittleren globalen Anstiegs des Meeresspiegels um 2 m gelten das östliche England und die Nordseeküsten der Niederlande, Belgiens, Deutschlands und Dänemarks, „außerdem die südliche Ostseeküste mit den Mündungen von Oder und Weichsel. Auch am Mittelmeer und am Schwarzen Meer gibt es dicht besiedelte, überflutungsgefährdete Räume, zum Beispiel das Po-Delta in Norditalien und die Lagune von Venedig sowie die Deltas von Rhône, Ebro und Donau. Schon heute liegen einige dicht besiedelte Gebiete in den Niederlanden, England, Deutschland und Italien unterhalb des normalen Flutwasserstands. Diese Gebiete wären ohne Küstenschutzmaßnahmen heute bereits überflutet.“¹¹⁹ Entsprechend wichtig sind für diese Regionen die Fragen nach der Geschwindigkeit des weiteren Meeresspiegelanstiegs und entsprechender Maßnahmen. Allgemein wird davon ausgegangen, dass die europäischen Staaten einem Anstieg in der Dimension von 2 m im globalen Mittel grundsätzlich begegnen könnten, ob durch Deicherhöhungen, Sandvorspülungen oder andere Küstenschutzmaßnahmen. Bei einem möglichen langfristigen Meeresspiegelanstieg von bis zu 5 m wird schon darauf hingewiesen, dass 85% der Küstenzone (gerechnet bis 10 km landeinwärts) der Niederlande und Belgiens, etwa 50% der Küstengebiete Deutschlands, 30% der von Dänemark und 22% derjenigen Polens unterhalb von 5 m über dem Meeresspiegel liegen. Studien gehen davon aus, dass bei einer Gefährdung des Rheindeltas

119 (Vgl.) WOR (2010, 2015). Die Zukunft der Küste – Verteidigung oder geordneter Rückzug?: <http://worldoceanreview.com/wor-1/kuesten/>

in den Niederlanden auch einem solchen Anstieg noch mit massiven (finanziell intensiven) Maßnahmen¹²⁰ begegnet werden könnte, dass aber Gebiete wie z.B. das Rhônedelta als dünn besiedelter Landstrich als wenig schützenswert eingestuft und ggf. ‚aufgegeben‘ werden könnten.¹²¹

6. Nachweise des Klimawandels als maßgeblich anthropogen verursachtem (laut Fünftem IPCC-Sachstandsbericht)

6.1. Ursachenkomplexe für Klimaänderungen

Da das Klimasystem durch variable Randbedingungen, externe Einwirkungen sowie interne Prozesse und Wechselwirkungen gekennzeichnet ist, kann es keine konstante Größe sein. Klimaschwankungen hat es schon immer gegeben und sie konstituieren eine grundlegende Eigenschaft dieses Systems. Maßgeblich lassen sich dabei drei Ursachenkomplexe/Faktoren für Klimaänderungen unterscheiden:

„Zum einen ändern sich immer wieder die **Randbedingungen** des Systems, beispielsweise durch plattentektonische Prozesse, die beispielsweise die Land-Meerverteilung auf der Erde, die Beschaffenheit der Ozeanbecken, die Position der Kontinente im Gradnetz und die Entstehung von Hochgebirgen bestimmen“. Dabei können Hochgebirge z.B. mit einer abkühlenden Wirkung auf das Globalklima oder auf atmosphärische Zirkulationen bei Querlage zur Hauptströmungsrichtung Einfluss auf die Klimaentwicklung nehmen. „Allerdings vollziehen sich diese Änderungen der Randbedingungen sehr langsam, so dass der damit einhergehende Klimawandel auf sehr großer Zeitskala angelegt ist.“¹²²

Des Weiteren gibt es „Prozesse innerhalb des Klimasystems, die „selbst bei konstanten Randbedingungen und hypothetisch unterstellten gleich bleibenden externen Einwirkungen ein breites

120 S. zu den allgemeinen Schutzstrategien und den Kosten: WOR (2010, 2015). Lebensraum Küste. Die alte Lösung gilt auch morgen. Wer nicht deichen will, muss weichen: <http://worldoceanreview.com/wor-1/kuesten/lebensraum-kueste/2/>.

Auch für Europa gelte: Würde der Meeresspiegel bis 2100 um deutlich mehr als einen Meter ansteigen, „dann werden die Deiche und Schutzbauwerke vielerorts nicht mehr hoch oder stabil genug sein. In vielen Regionen wird man neue Hochwasserschutzanlagen errichten und die Entwässerung im Binnenland aufwendig ausbauen müssen. Experten erwarten, dass die jährlichen Ausgaben für den Küstenschutz in Deutschland bei einem Anstieg von bis zu 2 m auf etwa eine Milliarde Euro klettern könnten – bei zu schützenden Sachwerten hinter den Deichen in Höhe von 800 bis 1000 Milliarden Euro. [...] Während für einige Länder der Kostenaufwand für Verteidigungs- und Anpassungsmaßnahmen lohnend erscheint, weil sich hinter den Deichen große volkswirtschaftliche Werte angehäuft haben, werden vor allem die ärmeren Küstengebiete wohl verloren gehen oder unbewohnbar werden“. Und in der Abwägung und Ermangelung finanzieller Mittel dürfte „aufgrund fehlender Küstenschutzmaßnahmen [...] vermutlich bereits ein moderater Meeresspiegelanstieg von nur wenigen Dezimetern zahlreiche Küstenbewohner in vielen Gebieten Asiens, Afrikas und Lateinamerikas aus ihrer Heimat vertreiben und damit zu Meeresflüchtlingen machen.“ S. oben; sowie WOR (2010, 2015). Lebensraum Küste. Die bange Frage, wie schlimm es wird: <http://worldoceanreview.com/wor-1/kuesten/lebensraum-kueste/>

121 (Vgl.) WOR (2010, 2015). Die Zukunft der Küste.

122 Endlicher, Wilfried; Gerstengarbe, Friedrich-Wilhelm (PIK Hrsg.) (2007). Der Klimawandel. Einblicke, Rückblicke, Ausblicke. Potsdam: 1: https://www.pik-potsdam.de/services/infothek/buecher_broschueren/images/broschuere cms 100.pdf

Hintergrundpotenzial interner Klimavariabilität konstituieren.“¹²³ Die **interne Klimavariabilität** entsteht dabei durch Wechselwirkungen in und zwischen den einzelnen Subsystemen des Klimasystems – zwischen Atmosphäre, Hydrosphäre (Ozeane, Seen, Flüsse), Kryosphäre (Eis und Schnee), Lithosphäre (Boden und Gesteinsschichten) und Biosphäre (Pflanzen und Tiere). Ein Beispiel dafür ist das El Niño-Phänomen im tropischen Pazifik, eine starke, kurzfristige, interne Klimaschwankung, bei der beginnend um die Weihnachtszeit die Oberflächentemperaturen des Ozeans in einem großen Gebiet im tropischen Pazifik ungewöhnlich erhöht sind und dabei auch große Folgen für die atmosphärische Zirkulation bewirken.

Und schließlich gibt es Prozesse, die von außen (über astronomische Erdbahnparametervariation, solare Aktivitätsschwankungen, explosiven Vulkanismus und auch anthropogene Einwirkungen) die **Strahlungs- und Energiebilanz** des Klimasystems **beeinflussen** und dadurch Klimaänderungen auslösen. Dabei wird Einfluss auf die Klimaentwicklung (unter Einhaltung des Energieerhaltungssatzes¹²⁴) genommen über:

- Änderungen der auf der Erde ankommenden Sonnenstrahlung,
- Änderungen der an der Erdoberfläche und in der Atmosphäre reflektierten Sonnenstrahlung oder
- Änderungen der in den Weltraum abgegebenen Wärmestrahlung.

Eine **Änderung** der auf der Erde **ankommenden Sonnenstrahlung** kann durch Änderungen in der **Umlaufbahn der Erde** - die erdgeschichtlich aber nur in Jahrtausendschritten vorkommen, dann aber sehr klimarelevant sind – oder durch eine Veränderung/**Variabilität der Sonnenstrahlung** (ausgehend von der Sonne selbst) verursacht sein. Letztere spielt eine wesentliche Rolle bei vielen Klimawechseln.

Da ein Teil der auf der Erde ankommenden Sonnenstrahlung in der Atmosphäre und an der Erdoberfläche grundsätzlich **reflektiert** und in den Weltraum zurückgestrahlt wird, haben dabei auch verstärkend oder abschwächend wirkende Mechanismen Einfluss auf die Klimaentwicklung. In der Atmosphäre reflektieren **Aerosole** (kleine schwebende Teilchen oder Tröpfchen) die Sonnenstrahlung. Eine Quelle für Aerosole sind zum Beispiel Vulkanausbrüche. Sie verursachen zeitweise einen höheren Aerosolgehalt der Atmosphäre (und kühlen tendenziell). Auch **Wolken** reflektieren einen Teil der einfallenden Strahlung. Vereinfacht ausgedrückt kühlen niedrige Wolken die Erde durch ihre Sonnenreflexion, hohe Wolken erwärmen die Erde. Auch die Beschaffenheit der Erdoberfläche beeinflusst das Rückstrahlvermögen gegenüber der Sonnenstrahlung (**Albedoeffekt**). Eine nur mit Wasser oder Wald bedeckte Erde wäre um einiges wärmer und eine nur mit Eis bedeckte Erde wäre (wegen der stärkeren Reflektion) erheblich kälter als gegenwärtig.

123 Endlicher; Gerstengarbe (2017). Der Klimawandel: 1f.

124 Danach muss das Verhältnis zwischen ankommender und abgehender Strahlung stets ausgeglichen sein. Wenn dieses Verhältnis nicht mehr im Gleichgewicht ist, ändert sich vereinfacht ausgedrückt das Klima so lange (z.B. über Erwärmung), bis sich ein neuer Gleichgewichtszustand (eine neue Gleichgewichtstemperatur) einstellt und die Energiebilanz wieder ausgeglichen ist.

Auch durch Bebauung, Landwirtschaft oder Rodung von Wäldern wird die Landoberfläche verändert und beeinflusst damit das Klima.¹²⁵

Treibhausgase und Treibhauseffekt

Und schließlich wird der Anteil der **in den Weltraum abgegebenen Wärmestrahlung** durch den **natürlichen Anteil an Gasen** in der Erdatmosphäre bestimmt, die Wärmestrahlung absorbieren – durch die klimawirksamen Spurengase.

Die Atmosphäre der Erde besteht zu ca. 78% aus Stickstoff (N₂), zu 20,1% aus Sauerstoff (O₂) und zu 0,9 % aus Argon (Ar) und zu weniger als 0,1% aus klimarelevanten Spurengasen. Hierzu gehören Kohlenstoffdioxid (CO₂), Methan (CH₄), Ozon (O₃), Distickstoffoxid (N₂O) u.a.. Diese Gase werden zusammen mit dem Wasserdampf (H₂O) als Treibhausgase bezeichnet, weil sie die aus dem All ankommende kurzwellige Sonnenstrahlung (nur leicht geschwächt) zwar bis zur Erdoberfläche vordringen lassen, aber einen Großteil der von der Erde (im Gegenzug) ausgestrahlten Infrarotstrahlung absorbieren, sich dadurch selbst erwärmen und Strahlung im längerwelligen Bereich als Gegenstrahlung zurück zur Erde emittieren und so den Anteil der in den Weltraum abgegebenen Wärmestrahlung über so genannte „Fenster“ (Strahlungsfenster im bestimmten Spektralbereich) verringern. Das führt zu einer höheren Energieeinstrahlung, als dies ohne solche Gase der Fall wäre. So erwärmen sich der Erdboden und der untere Bereich der Atmosphäre (die Troposphäre). Dieser Erwärmungseffekt wird - in Analogie mit den Vorgängen in einem Treibhaus, dessen Glasdach ebenfalls die Sonne gut durchlässt, die Wärmestrahlung von der Erdoberfläche aber nicht hinauslässt - als natürlicher Treibhauseffekt bezeichnet, der zu der heutigen bzw. vorindustriellen globalen Mitteltemperatur von ca. 14°C/15°C führt/e.¹²⁶ Dabei tragen das Treibhausgas Wasserdampf mit 36 bis 66%, CO₂ mit 9 bis 26% und Methan mit 4 bis 9% zum natürlichen Treibhauseffekt bei – die Bandbreite erklärt sich aus den örtlichen und zeitlichen Schwankungen.

Würde eine Atmosphäre aus reinem Sauerstoff und Stickstoff bestehen, die zu nahezu 99% die Hauptkomponenten der Atmosphäre bilden, würde der natürliche Treibhauseffekt nicht zu Stande kommen, da diese Gase die beiden genannten Strahlungsarten nur unwesentlich beeinflussen.

125 Vgl. zu den zwei letzten Absätzen UBA (2013). Und sie erwärmt sich doch – Was steckt hinter der Debatte um den Klimawandel?: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/sie-erwaermt-sich-doch-was-steckt-hinter-debatte-um> sowie: UBA (2012). Sonne, Treibhausgase, Aerosole, Vulkanausbrüche – gibt es einen Favoriten bei Klimaänderungen?: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/sonne_treibhausgase_aerosole_vulkanausbrueche.pdf ; sowie BpB (2014). Vom Menschen gemacht. Der anthropogene Treibhauseffekt: <https://www.bpb.de/gesellschaft/umwelt/klimawandel/38441/anthropogener-treibhauseffekt>

126 Hätte die Erde keine Atmosphäre, würde nur die Bilanz zwischen eingestrahelter Sonnenenergie und der vom Boden abgestrahlten Wärmestrahlung die Oberflächentemperatur bestimmen; bei angenommener heutiger Bedeckung der Erde (Albedoeffekt), betrüge dann die globale mittlere Oberflächentemperatur nur etwa -18°C.

Das IPCC schätzt den Grad des wissenschaftlichen Verständnisses über die Wirkung von Treibhausgasen als hoch ein.¹²⁷

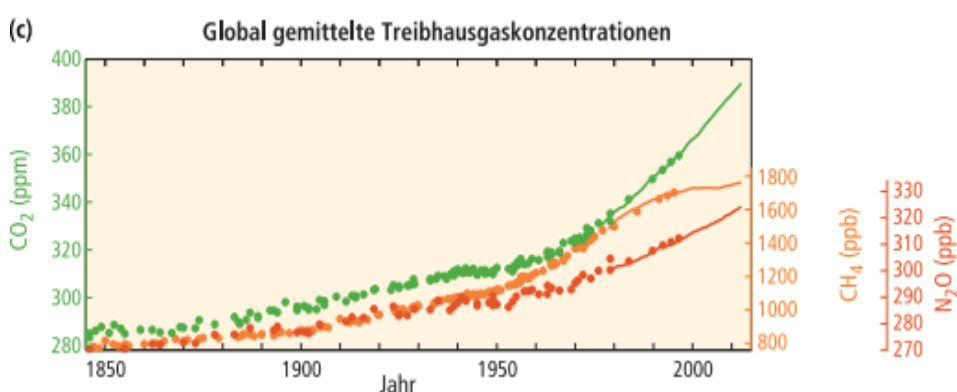
Anthropogener Treibhauseffekt

Werden die natürlich vorhandenen Treibhausgase (z.B. CO₂) durch anthropogenen Einfluss vermehrt¹²⁸ oder durch neue Stoffe (z.B. FCKW) ergänzt, so trifft die dadurch verursachte zusätzliche Wärmestrahlung aus der Atmosphäre auf den Erdboden und erhöht infolge dieses verstärkten (dann anthropogenen) Treibhauseffektes die Temperatur des Bodens und der unteren Atmosphäre.¹²⁹

6.2. Eintrag anthropogener Treibhausgase

6.2.1. Treibhausgas-Emissionsentwicklung

Wie bereits in Kapitel 4.1.5 dargestellt, stieg die Konzentration der bedeutendsten Treibhausgase seit Beginn der Industrialisierung stark an: die Konzentration von CO₂ stieg gegenüber vordindustriellem Niveau um 40%, die von Methan (CH₄) um 150% und die von Lachgas (N₂O) um 20% (s. Abbildung).



Beobachtete Veränderungen der atmos. THG-Konzentrationen. Punkte = Daten aus Eisbohrkernen, direkte atmos. Messungen = überlagerte Linien; IPCC 2014 (Übersetzung 2016). Synthesereport: 3

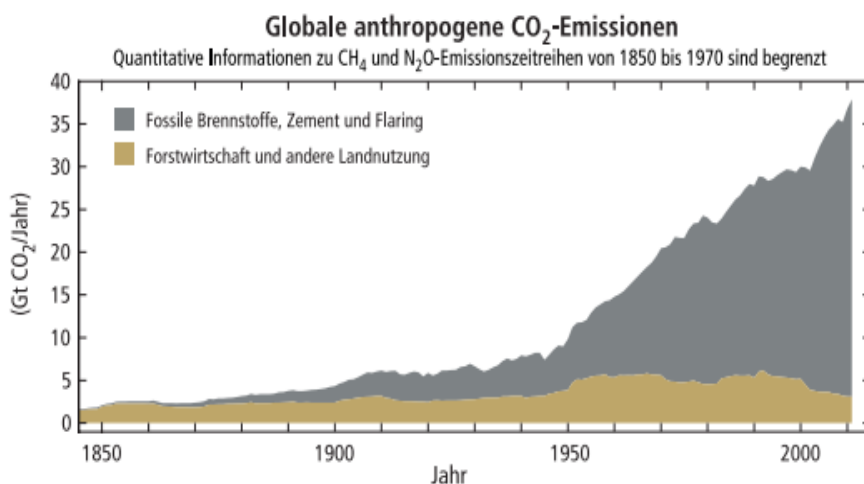
- 127 Vgl. zu dem gesamten Kapitelteil des Treibhauseffektes: Max-Planck- Institut für Meteorologie (2002). Wie funktioniert der Treibhauseffekt? <https://www.mpimet.mpg.de/kommunikation/fragen-zu-klima-faq/wie-funktioniert-der-treibhauseffekt/>; sowie Warnsignal Klima (2015) (Universität Hamburg, Max-Planck-Institut für Meteorologie, BMUB, Beatrix-Nolte-Stiftung für Natur- und Umweltschutz). Was ist der Treibhauseffekt?: <http://www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de/treibhauseffekt/>
- 128 Vgl. zu den Absorptionseigenschaften von CO₂, insbesondere der Frage einer möglichen ‚Sättigung‘ von CO₂/von Absorptionsbanden in der Atmosphäre: UBA 2015
- 129 Der Treibhauseffekt ist seit Beginn des 19. Jahrhunderts durch Jean Baptiste Joseph Fourier („wärmender atmosphärischer Effekt“) entdeckt. John Tyndall bewies 1862 mit dem Differenzspektrometer die Behauptung, dass Gase in der Atmosphäre die Wärme absorbieren können und betrachtete dabei auch die mögliche Beeinflussung von Wasserdampf- und CO₂-Konzentration auf den Wärmehaushalt der Erde. Svante Arrhenius beschrieb 1896 erstmals den möglichen Einfluss einer Verdopplung der CO₂-Konzentration durch die Verbrennung fossiler Energiequellen auf die mittlere Erdtemperatur. Messtechnisch nachgewiesen werden kann der anthropogene Treibhauseffekt mit Beginn der CO₂-Messungen auf Hawaii (und den weiteren Stationen) seit Ende der 1950er Jahre (s. dazu auch Kapitel 4.1.5.2).

Laut Fünftem IPCC-Sachstandsbericht beliefen sich zwischen 1750 und 2011 die kumulativen anthropogenen CO₂-Emissionen, die in die Atmosphäre abgegeben wurden, auf 2040 (+-310, Bandbreite) Gt CO₂. Etwa 40% dieser Emissionen sind in der Atmosphäre verblieben (880, ± 35 Gt CO₂). Der Rest wurde durch Senken aus der Atmosphäre entfernt und in Reservoirs des natürlichen Kohlenstoffkreislaufs gespeichert (etwa zu gleichen Teilen durch ozeanische Aufnahme sowie durch Vegetation und Böden).

Dabei kann bei „hohem Vertrauen“ festgestellt werden, dass etwa die Hälfte der kumulativen anthropogenen CO₂-Emissionen in den letzten 40 Jahren (bei Stand 2011) erfolgte; bei den Treibhausgasen insgesamt sind die höchsten Anstiegsraten bisher 2000 bis 2010 zu verzeichnen: Die CO₂-Emissionen aus fossilen Brennstoffen erreichten 2010 32 (± 2,7) Gt CO₂ p.a. und stiegen zwischen bis 2011 weiter um ca. 3%.

Mit einem Anteil von **76%** an den gesamten anthropogenen Treibhausgasemissionen im Jahr 2010 blieb **CO₂** - wie auch stets zuvor – **das bedeutendste anthropogene Treibhausgas**. Von den gesamten Emissionen stammten **16% aus CH₄**, **6,2% aus N₂O** und **2,0% aus fluorierten Gasen** (F-Gasen).

Der IPCC stellt fest, dass sich **seit 1970 die kumulativen CO₂-Emissionen aus der Nutzung fossiler Brennstoffe, der Zementproduktion und dem Abfackeln** („flaring“) **verdreifacht** haben und die kumulativen CO₂-Emissionen aus Forstwirtschaft und anderer Landnutzung (FOLU) um etwa 40% gestiegen sind (s. Abbildung).¹³⁰



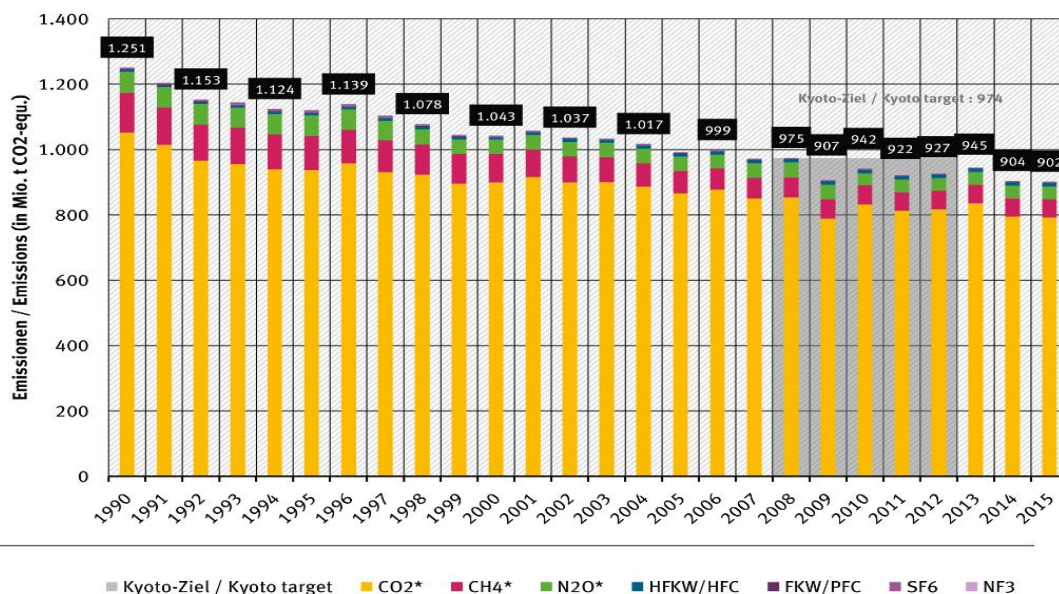
Anstieg jährlicher globaler anthropogener Kohlendioxid-Emissionen (Gt CO₂/Jahr) aus fossilen Brennstoffen und Forstwirtschaft, IPCC 2014 (Übersetzung 2016). Synthesebereicht: 45

130 Vgl. zu allen vorangehend gemachten Angaben dieses Unterkapitels IPCC (2014, Übersetzung 2016). Klimaänderung 2014: Synthesebericht. Beitrag der Arbeitsgruppen I, II und III zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC). Deutsche Übersetzung durch Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Bonn: 5, 45f: http://www.de-ipcc.de/media/content/IPCC-AR5_SYR_barrierefrei.pdf

In Deutschland beliefen sich die in CO₂-Äquivalente umgerechneten Gesamtemissionen (ohne Kohlendioxid-Emissionen aus Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft) im Jahr 2015 auf 902 Mio. t (s. Abbildung).¹³¹

Jährliche Treibhausgas-Emissionen in Deutschland / Annual greenhouse gas emissions in
nach Substanz / by substance

UBA 2017



Alle Treibhausgase (CO₂, CH₄, N₂O, O₃, FCKW) haben ein unterschiedliches Treibhauspotenzial, woraus sich dann auch ihre unterschiedlichen Berechnungen für die Darstellung als CO₂-Äquivalent ergeben. So ist Methan etwa 21- und Lachgas 300-mal so wirksam wie CO₂. Methan verbleibt ca. 12 Jahre in der Atmosphäre, Lachgas ca. 100, die Verweildauer von Kohlenstoffdioxid kann im Bereich von Jahrhunderten liegen. Die

Verweildauer für FCKW beträgt ca. 600 Jahre, von FKW ca. 200 Jahre und von NF₃ (Stickstofftrifluorid) ca. 500 Jahre.

Exkurs F-Gase

Natürlich nicht vorkommende Fluorchlorkohlenwasserstoffe (**FCKW**) sind im Laufe der technischen Entwicklung auch in die Atmosphäre eingetragen worden. Sie wurden z.B. als Kühlmittel oder Treibsubstanz in Spraydosen verwendet. Neben der Treibhausgaswirkung schwächen sie außerdem die Ozonschicht in der Stratosphäre. Nach dem sogenannten Montrealer Protokoll von 1987, einem in Folge mehrfach verschärften internationalen Übereinkommen, wurde seit dem 1. Januar 1996 zum Schutz der Ozonschicht die Produktion von FCKW fast vollständig eingestellt.

131 (Vgl.) UBA (2017). Treibhausgas-Emissionen in Deutschland. Artikel vom 20.3.2017: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klimawandel/treibhausgas-emissionen-in-deutschland#textpart-1>

Weitere äußerst langlebige **halogenisierte Kohlenwasserstoffe** sind PFKW (perfluorierte Kohlenwasserstoffe), HFKW (teilweise halogenierte Fluorkohlenwasserstoffe) und SF₆ (Schwefelhexafluorid), wobei HFKW häufig als Ersatz für FCKW verwendet wird. Das bodennahe Ozon (O₃) wird nicht emittiert, sondern entsteht in Ballungs- und Industriezentren durch chemische Prozesse in der Luft aus Stickstoffverbindungen und Kohlenwasserstoffen sowie anderer Spurengase.

6.2.2. Quellen der anthropogen eingetragenen Treibhausgase

Der Konzentrationsanstieg der Treibhausgase wird in der Forschung eindeutig menschlichen Aktivitäten zugeordnet.

Die Hauptquellen der zusätzlichen Treibhausgase sind dabei die **Nutzung fossiler Brennstoffe** (also vor allem CO₂ aus der Kohle-, Erdöl- und Erdgasnutzung; teilweise Methan als Grubengas oder aus der Erdgas- und Erdölproduktion) und **industrielle Prozesse** (wie die Zementproduktion). Aus der **Chemieproduktion** stammen vor allem die neuen Treibhausgase, wie z.B. HFKW, die als Treibgase in Sprühdosen, Kältemittel in Kühlanlagen oder Füllgase in Schaumstoffen verwendet werden oder NF₃, was aus der Herstellung von Halbleitern, Solarzellen und Flüssigkristallbildschirmen stammt.

Weitere Quellen der global emittierten Treibhausgase sind die zunehmend **intensiver betriebene Landwirtschaft** und die **Vernichtung der Wälder**.

Durch die Vernichtung der Wälder verschwinden nicht nur die Bäume, sondern auch weitere **Vegetation zersetzt** sich teilweise, Feuchtgebiete werden trockengelegt, das im Boden gebundene organische Material (z.B. Humus) wird zumindest teilweise abgebaut. All diese Prozesse setzen **CO₂ und CH₄¹³² frei**. In den letzten 160 Jahren wurden auf diese Weise ca. 20% (117 Mrd. t C) des in der Vegetation gebundenen Kohlenstoffs weltweit freigesetzt. Gleichzeitig gingen CO₂-Senken¹³³ wie Feuchtgebiete verloren.

Methan entsteht mikrobiell nicht nur in den Böden, Feuchtgebieten und Flachgewässern, sondern auch im Pansen der Wiederkäuer: Nachdem sich die **Rinderzucht** im letzten Jahrhundert vervierfacht und die Schafhaltung verdoppelt hat, erwartet man bis zum Jahr 2100 noch eine Verdopplung der Anzahl der Tiere in der Viehhaltung. Auch bei der Lagerung der Tierexkrememente (Gülle) entsteht Methan. Die Viehzucht trägt damit zur Freisetzung von Methan erheblich bei.

132 CO₂ entsteht bei der Zersetzung organischen Materials über Mikroorganismen mit Sauerstoff; Methan entsteht bei der Zersetzung organischen Materials bei (bereits) niedriger vorliegender Sauerstoffkonzentration über die Reaktion mit Archaeobakterien.- So wird Methan sowohl beim Verlust von Feuchtgebieten als auch beim (Nass-) Reisanbau (s. übernächster Absatz) freigesetzt. Bei letzterem ist die Methanfreisetzung sogar erheblich, da es in überschwemmten Reisfeldern hohe Konzentrationen von Archaeobakterien im Schlamm gibt. Daher führen lange Überflutungszeiten (bei geringeren Konzentrationen von Sauerstoff und anderen Oxidationsmitteln) zur noch erhöhten Methan-Freisetzung.

133 Wie Wälder binden Feuchtgebiete Kohlenstoff und fungieren daher als Kohlenstoffspeicher, als so genannte CO₂-Senken. Bei ihrem (teilweisen) Verlust wird der Kohlenstoff (teilweise) wieder an die Atmosphäre freigegeben

Aus den gleichen Gründen wie für Feuchtgebiete und Flachgewässer trägt der **Reisanbau** ebenfalls erheblich zur Methanfreisetzung bei. In den letzten 40 Jahren nahm die Fläche zwar nur um 17% zu, aber der Ertrag stieg auf Grund der technischen Verbesserungen um 41%. Das **Lachgas** (N₂O, Di-Stickstoffoxid) entsteht als Zwischenprodukt bei der mikrobiellen Umsetzung von anorganischen Stickstoffverbindungen in Gewässern und vor allem in Böden.

Auch bei **Verbrennung organischen Materials** (wie Brandrodung und Savannenbrände) bildet sich Lachgas. Ein Teil davon gelangt in die Atmosphäre. Obwohl es noch viele offene Fragen über die Bildung von N₂O aus den verschiedenen Stickstoffverbindungen gibt, ist die Proportionalität zwischen dem N₂O-Anstieg und der starken **Düngung** wissenschaftlich belegt. Mit der weltweiten Intensivierung der Landwirtschaft ist daher auch mit einer weiteren Zunahme von N₂O zu rechnen.

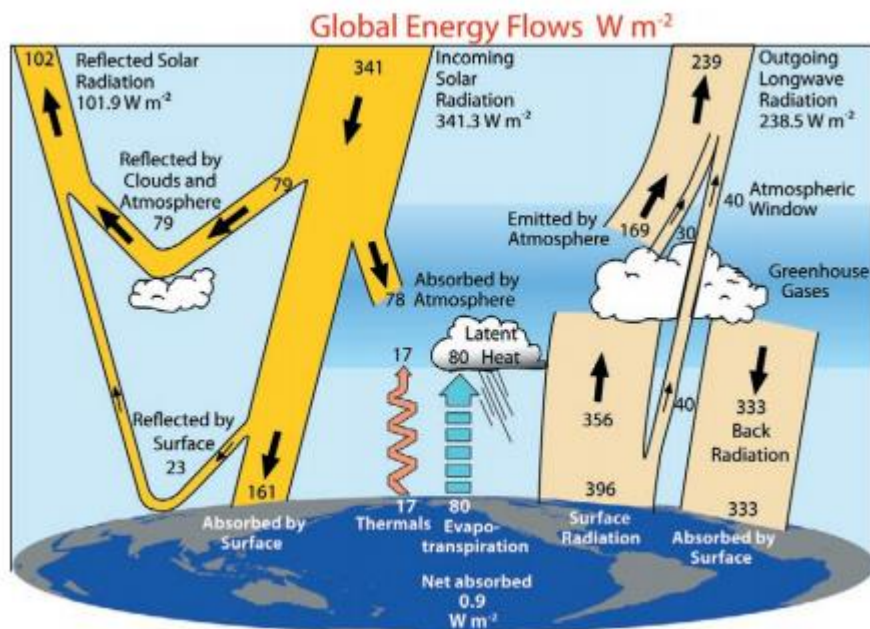
Insgesamt sind die veränderten Energieflüsse an der Oberfläche durch Landnutzungsänderungen wie Rodung, Bewässerung und Städtebau für den anthropogenen Treibhauseffekt ebenfalls von Bedeutung. Dieser anthropogene Klimaeinfluss tritt seit Jahrtausenden auf. Beispiele dafür sind die Rodung von Wäldern und die Bewässerung von Trockenzonen. Er ist schwieriger zu quantifizieren als der Einfluss von Gasen, weil je nach menschlicher Aktivität die Strahlungs-, Wärme- und Impulsflüsse verstärkt oder vermindert werden. Neu entwickelte Klimamodellierung erlaubt in letzten IPCC-Berichten eine entsprechende Schätzung von Emissionen infolge veränderter Landoberflächeneigenschaften. Unter **FOLU** („Forestry and Other Land Use“) **werden Emissionen von CO₂, CH₄ und N₂O zusammengefasst, die aus Landmanagementaktivitäten resultieren.** Hierzu gehören Waldflächen, die zu anderen Landnutzungen umgewandelt wurden, sowie zusätzliche CO₂-Emissionen durch Brände und Entwässerung von Böden.¹³⁴

6.3. Änderung der Strahlungsbilanz: Treiber des gestiegenen Strahlungsantriebs

Die Konsequenz der **anthropogenen Kohlenstofffreisetzung** (mit der Folge des Konzentrationsanstiegs von CO₂), der Freisetzung weiterer Klimagase und zusätzlicher Partikeleinträge ist eine **Veränderung** zunächst der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre und daraus resultierend **des troposphärischen Strahlungshaushaltes.**

Zur besseren Vorstellung einer (veränderten) **Energiebilanz** des Strahlungshaushaltes kann die nachfolgende Grafik dienen, die – ohne hier auf die Details eingehen zu können – die Strahlungsflussdichten einzelner Wirkmechanismen, die zum (anthropogen jetzt verstärkend wirkenden) Treibhauseffekt gehören, **schematisch veranschaulicht:** (rechts die Treibhausgase mit ihrer erzeugenden ‚Gegenstrahlung‘).

134 Vgl. (auch wörtlich) Schönwiese, Christian (2013). Klimatologie. 4. Auflage. Stuttgart zit. nach Warnsignal Klima 2015.



Globale Energiebilanz der Erde 2000/2004, Angaben in Strahlungsflussdichten (W/m^2); Trenberth u.a. 2008¹³⁵

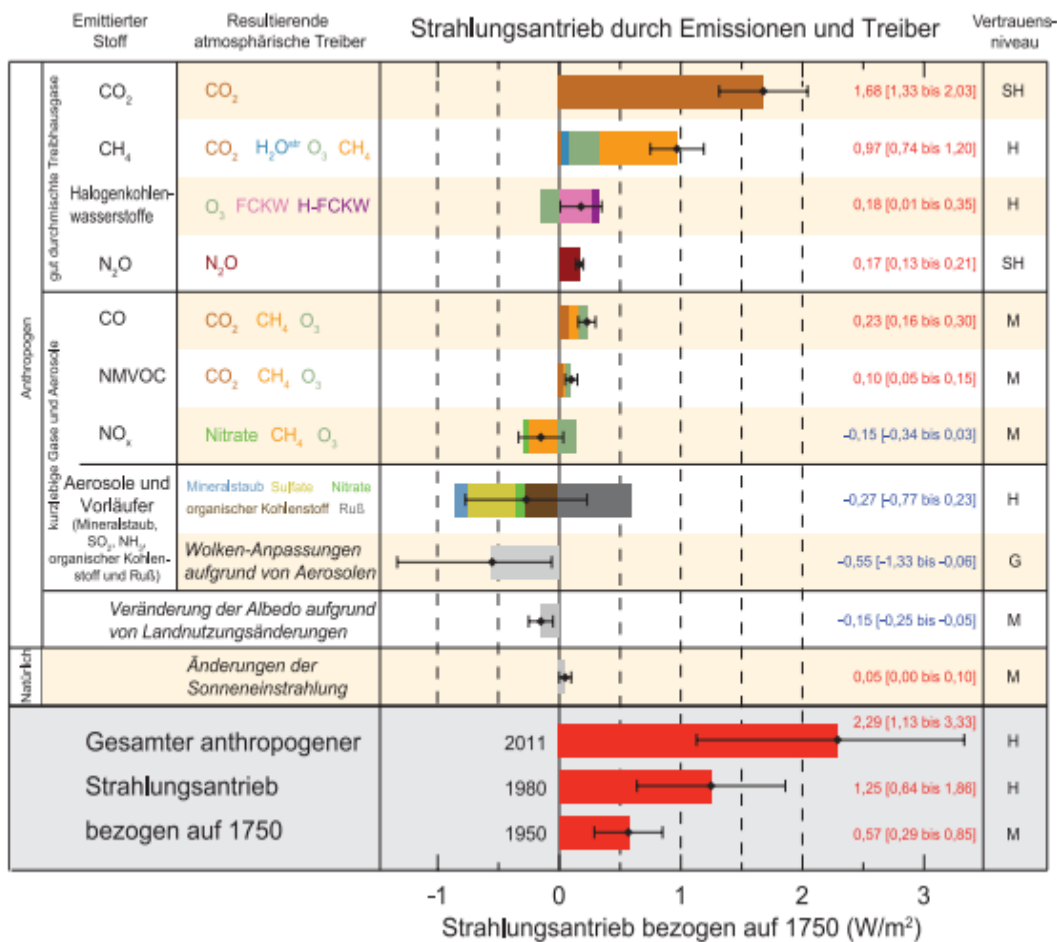
Die **natürlichen und anthropogenen Prozesse und Gase, die den Strahlungstransport beeinflussen** und bei ihrer Zunahme in der Atmosphäre dabei die Energiebilanz der Erde verändern, werden als „**Treiber des Klimawandels**“ bezeichnet. Ihre Zunahme wird als zusätzlicher Strahlungsantrieb¹³⁶ – gemessen in Watt pro Quadratmeter- wirksam.

Für die einzelnen natürlichen und anthropogenen Komponenten wird der jeweilige **erzeugte Strahlungsantrieb** („radiative forcing“ **RF**) in den IPCC-Sachstandsberichten quantifiziert. Dabei führt ein **positiver** Strahlungsantrieb - darüber, dass mehr Energie pro m^2 Erdoberfläche zur Verfügung steht - zu einer Erwärmung der Erdoberfläche und der unteren Atmosphäre; ein **negativer** Strahlungsantrieb zu einer Abkühlung oder (Teil-)Kompensation einer Erwärmung.¹³⁷

135 Kevin E. Trenberth, Kevin E. u.a. (2009). Earth's global energy budget. American Meteorological society. March: <http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/2008BAMS2634.1>

136 Der Strahlungsantrieb gibt die Nettostrahlungsflussdichte an der Tropopause an und beschreibt die Änderung der Energiebilanz der Erde und den Einfluss einzelner Komponenten dabei.

137 Der in den IPCC-Berichten abgeschätzte RF beruht auf in-situ- und Fernerkundungs-Beobachtungen zu Konzentrationen, den Eigenschaften von Treibhausgasen und Aerosolen sowie Berechnungen mit numerischen Modellen und kann basierend auf atmosphärischen Konzentrationsänderungen für jede Substanz beschrieben werden.



Schätzwerte des Strahlungsantriebs im Jahr 2011, bezogen auf 1750, die schwarzen Balken geben die Unsicherheitsbereiche an; IPCC 2013/2014¹³⁸

Im Fünften Sachstandsbericht des IPCC wird der gesamte menschengemachte Strahlungsantrieb netto (d.h. nach Abzug ebenfalls kühlender Effekte durch Aerosole und Albedo) auf 2,3 W/m² beziffert (s. Abbildung).

Der Wert ist damit gegenüber dem vorangehenden Sachstandsbericht, bezogen auf das Jahr 2005, wo er noch auf 1,6 W/m² beziffert wurde, um 43% höher. Der IPCC erklärt dies durch die Kombination des fortwährenden Anstiegs der meisten Treibhausgaskonzentrationen und verbesserte

138 IPCC 2013/2014. Klimaänderung 2013/2014: Naturwissenschaftliche Grundlagen. Zusammenfassungen für politische Entscheidungsträger. Übersetzung durch Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Österreichisches Umweltbundesamt, ProClim. Bonn/Wien/Bern 2016: S. 12: <https://www.ipcc.ch/pdf/reports-nonUN-translations/dutch/ar5-wg1-spm.pdf>. Zur Grafik: „Der Albedo-Antrieb durch Ruß auf Schnee und Eis ist im Ruß-Aerosol-Balken enthalten. Kleine Antriebe durch Kondensstreifen (0,05 W/m², einschließlich durch Kondensstreifen gebildete Cirruswolken) und H-FKW, PFC und SF₆ (gesamt 0,03 W/m²) sind nicht dargestellt. Konzentrationsbasierte RF für Gase können durch das Summieren der gleich gefärbten Balken erhalten werden. Der vulkanische Antrieb ist nicht aufgeführt, da dessen episodischer Charakter einen Vergleich mit anderen Antriebsmechanismen schwierig macht. Der gesamte anthropogene Strahlungsantrieb ist für drei verschiedene Jahre bezogen auf 1750 dargestellt.“

Schätzungen für den RF durch Aerosole. Allerdings tragen letztere weiterhin die größte Unsicherheit zum gesamten RF-Schätzwert (teilweise „G“ = „geringes Vertrauen“)¹³⁹ bei.

Emissionen von CO₂ verursachten einen Strahlungsantrieb von **1,68 W/m²** (unter Einbeziehung von Emissionen anderer kohlenstoffhaltiger Gase, die ebenfalls zum Anstieg der CO₂-Konzentration beigetragen haben, ergibt sich ein RF für CO₂ von 1,82 W/m²), gefolgt von **Methan** mit allein **0,97 W/m² RF**. Halogenwasserstoffe verursachten einen Strahlungsantrieb von 0,18 W/m², Lachgas 0,17 W/m². Ebenfalls verantwortlich für einen positiven Strahlungsantrieb waren Fluorkohlenwasserstoffe, deren Beitrag nach einem massiven Rückgang der weltweiten Produktion abnimmt. Von den kurzlebigen Treibhausgasen hatte Ozon den höchsten Strahlungsantrieb. Emissionen von Kohlenmonoxid haben „praktisch sicher“ einen positiven RF bewirkt, während Emissionen aus Stickstoffoxiden „wahrscheinlich“ einen negativen RF verursacht haben. Einen **negativen** (d.h. kühlenden) Strahlungsantrieb in Höhe von insgesamt **-0,9 W/m²** verursacht der gesamte **Aerosoleffekt**, welcher Wolkenanpassungen aufgrund von Aerosolen einschließt („mittleres Vertrauen“) und von einem negativen Antrieb der meisten Aerosole und einem positiven Beitrag der Absorption von Sonneinstrahlung durch Ruß stammt.

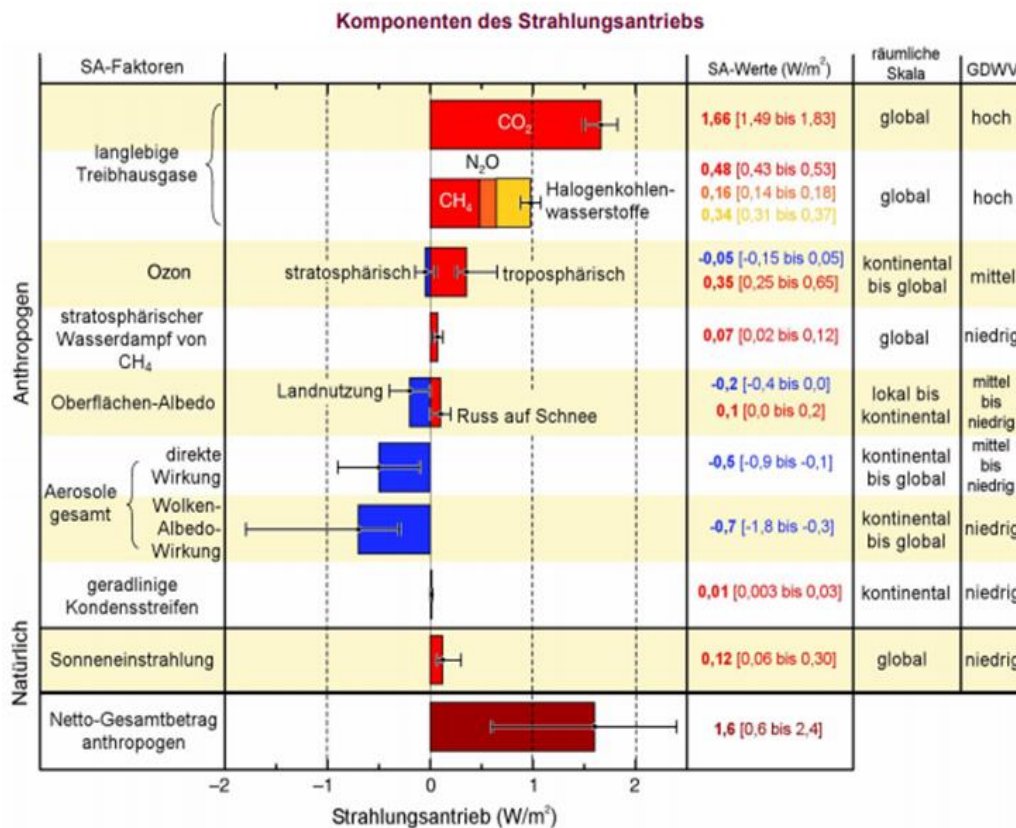
Die **Sonnenaktivität** machte einen Strahlungsantrieb von **0,05 (0,00 bis 0,10) W/ m²** aus. Satellitenbeobachtungen der gesamten Veränderungen der Sonneneinstrahlung von 1978 bis 2011 deuten laut Fünften Sachstandsberichtsbericht darauf hin, dass das jüngste Minimum niedriger war als die zwei vorherigen. Dies bewirkt einen RF von -0,04 W/m² zwischen dem 2008 und dem Minimum von 1986.

Laut 5. Sachstandsbericht haben mehrere kleinere Vulkanausbrüche in den Jahren 2008 bis 2011 einen RF von -0,01 verursacht, was ungefähr doppelt so viel ist, wie zwischen 1999-2002.

Der IPCC stellt insgesamt fest, dass **natürliche RF** damit **nur wenig zum Netto-Strahlungsantrieb** im letzten Jahrhundert beitragen, mit Ausnahme von kurzen Perioden nach großen Vulkanausbrüchen.

Der Vergleich zu den im Vierten Sachstandsbericht bestimmten Strahlungsantrieben:

139 Vgl. zur Wolkenforschung und ihren Schwierigkeiten z.B. auch DKK (2015). Hintergrundinformationen des Deutschen Klima-Konsortiums. Wolkenforschung. Artikel vom 11.2.2015: <http://www.deutsches-klima-konsortium.de/de/veranstaltungen/dkk-veranstaltungen/dkk-klima-fruehstueck.html?expand=2303&cHash=94357827087f79c1990aa87ef5250da5>



Komponenten des global gemittelten Strahlungsantriebs 2005 gegenüber vorindustriellem Niveau (+Beurteilung des Grades des wissenschaftlichen Verständnisses); IPCC-Synthesebericht 2007: 43¹⁴⁰

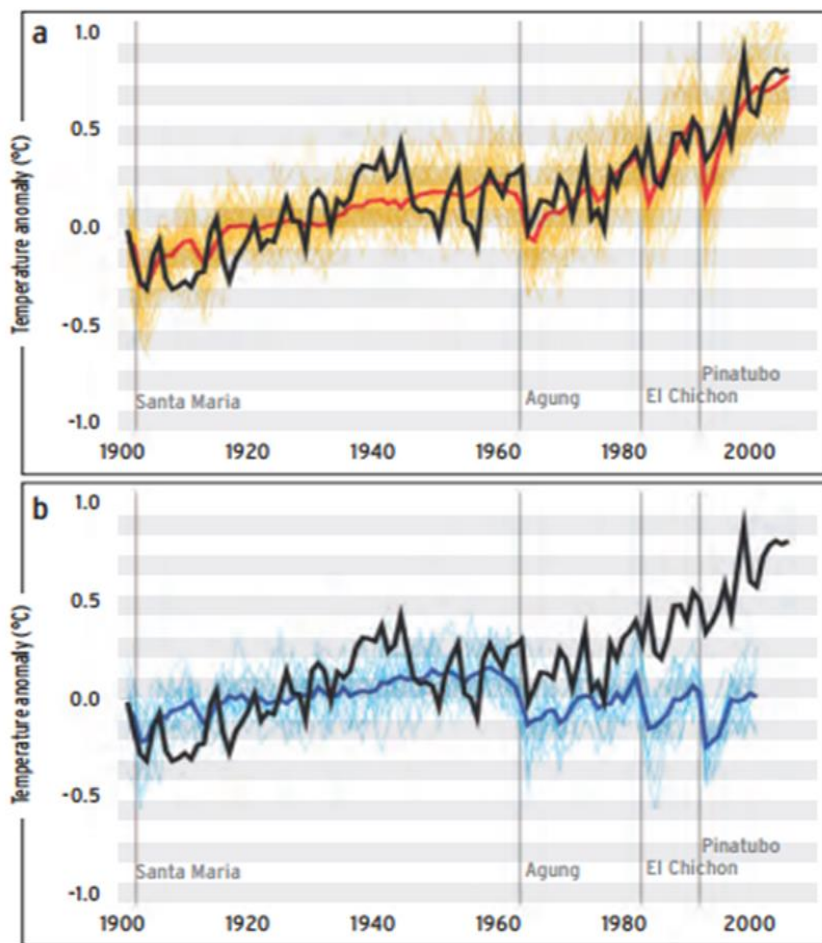
Da insgesamt die Veränderung des Klimas durch ein Zusammenwirken von Strahlungsantrieb, klimatischen Rückkopplungseffekten (wie Wasserdampf und Albedo) und Energiespeicherungen im Klimasystem (wie im Ozean) bestimmt wird, kann der Einfluss von verschiedenen Emissionen auf die Klimaveränderung nicht eins zu eins aus dem verursachten Strahlungsantrieb abgeleitet werden. Dennoch kann der positive anthropogene Strahlungsantrieb zeigen, dass sehr vereinfacht ausgedrückt **unter physikalischen Gesichtspunkten (mit Wirkung auf die Strahlungsbilanz) die Größenordnungen von beobachtetem Treibhausgasanstieg und beobachteter Erwärmung übereinstimmen.**

6.4. Simulationsmodelle: Unerklärbarkeit der derzeitigen Erwärmung ohne anthropogene Faktoren

Auch unterschiedliche Klimasimulationsrechnungen ergeben übereinstimmend, dass der größte Teil der globalen Erwärmung seit Mitte des 20. Jahrhunderts maßgeblich anthropogen verursacht ist.

140 IPCC (2007, Übersetzung 2008). Klimaänderung 2007. Synthesebericht. Übersetzung der deutschen Koordinierungsstelle. Bonn: <https://www.ipcc.ch/pdf/reports-nonUN-translations/deutch/IPCC2007-SYR-german.pdf> „Aerosole aus explosiven Vulkanausbrüchen führen zu einer zusätzlichen episodischen Abkühlungsphase für ein paar Jahre nach einer Eruption. Die Bandbreite geradliniger Kondensstreifen schließt keine anderen möglichen Effekte der Luftfahrt auf die Bewölkung mit ein.“

In der Gegenüberstellung von Simulationen, in denen nur natürliche Einflüsse zu Grunde gelegt werden, und solchen, die sowohl natürliche (solarer Energiefluss, Vulkanausbrüche) als auch anthropogene Einflüsse (Freisetzung klimawirksamer Spurengase, Partikelemissionen, Veränderungen der Erdoberflächenbeschaffenheit) einbeziehen, kann die beobachtete Temperaturentwicklung jeweils nur unterschiedlich gut abgebildet werden.



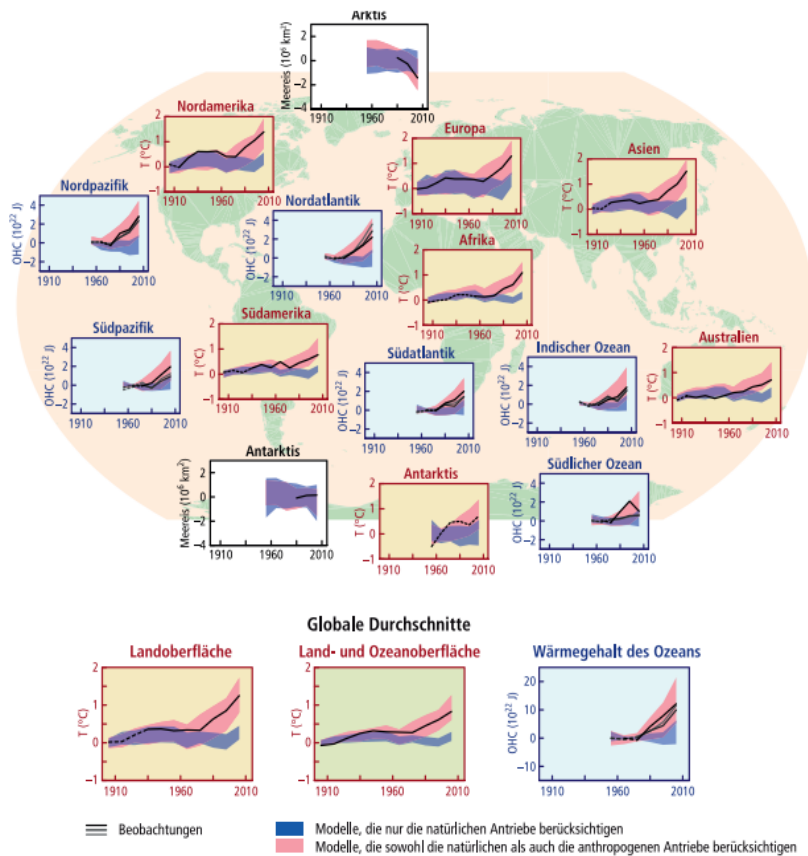
Quelle: IPCC 2007, Abb. 9.5
http://www.ipcc.ch/publications_and_data/data/images/figure9-5.html

Dünne gelbe Linien = Ergebnisse aus 58 Simulationen mit 14 unterschiedlichen Klimamodellen, bei Zugrundelegung sowohl natürlicher als auch anthropogener Einflüsse auf das Klima; **rote Kurve**=Ensemblemittel dieser Simulationen. **Dünne blaue Linien** = Ergebnisse von 19 Simulationen mit 5 verschiedenen Klimamodellen, bei ausschließlicher Zugrundelegung natürlicher Einflüsse (ohne erhöhte Treibhausgaskonzentrationen); **dicke blaue Linie**= Ensemblemittel dieser Rechnungen. **Dicke schwarze Linie**=beobachtete Temperaturabweichung vom Mittelwert im Zeitraum 1901–1950. Die vertikalen grauen Linien geben die Zeitpunkte größerer Vulkanausbrüche an. IPCC 2007

So zeigen die Ergebnisse der Simulationen, dass der größte Teil der globalen Erwärmung in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts (noch) auch mit natürlichen Faktoren erklärt werden kann, dass aber im späten 20. und dem frühen 21. Jahrhundert die steigenden atmosphärischen Treibhausgaskonzentrationen der entscheidende Faktor für die globale Erwärmung waren. Schon ab den 1960er Jahren des vorigen Jahrhunderts beginnt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Beobachtungsdaten und Ensemblemittel der Modellsimulationen erkennbar zu werden. Die Modellrechnungen mit natürlichen Klimaeinflüssen (wie Änderungen des solaren Energieflusses, Vulkanausbrüche) stimmen hingegen dann ab den 1960er Jahren weniger gut mit den Beobachtungsdaten überein und driften etwa ab Ende der 1970er Jahre stark auseinander.

Auch die Darstellung der Simulationen im Vergleich des beobachteten und simulierten Klimawandels, einmal anhand ausschließlich natürlicher und einmal einschließlich anthropogener Faktoren ergibt ein ähnliches Bild – basierend auf drei großräumigen Indikatoren in der Atmo-

sphäre, der Kryosphäre und dem Ozean; Änderungen der kontinentalen Landoberflächentemperaturen (gelbe Felder), Ausdehnung des arktischen und antarktischen Meereises im September (weiße Felder) und Wärmegehalt der oberen Ozeanschicht in den großen Ozeanbecken (blaue Felder) :



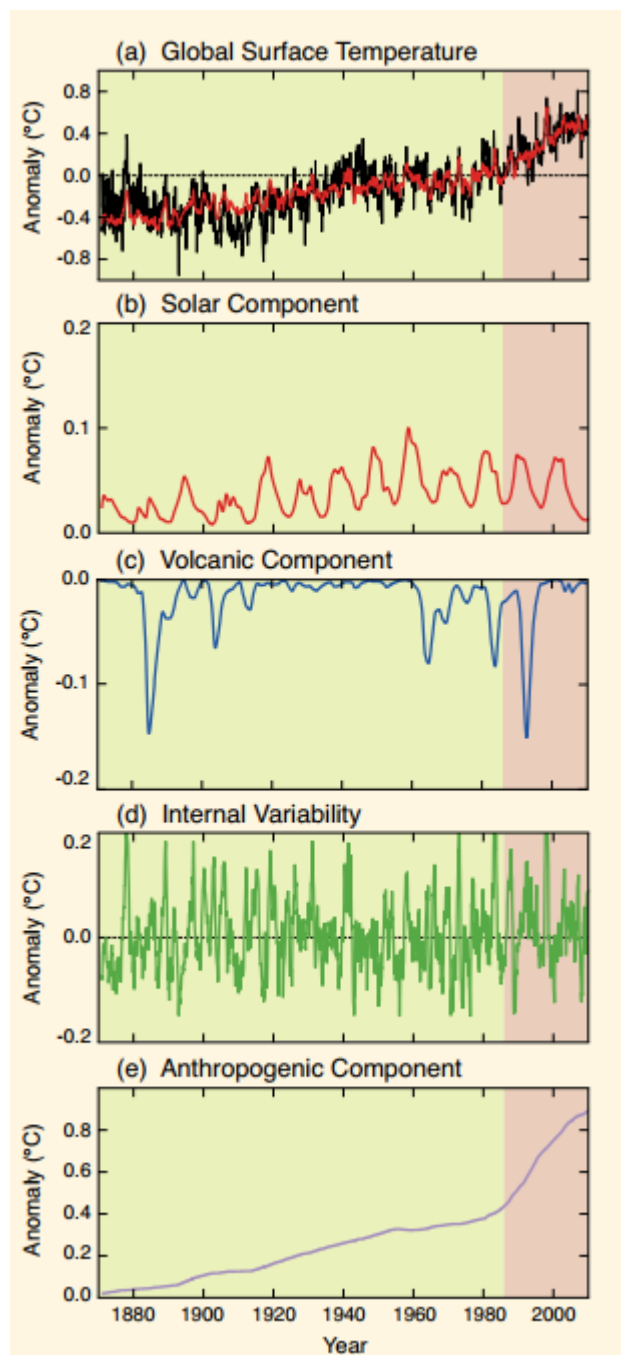
IPCC 2014 (Übersetzung 2016). Synthesebericht: 49¹⁴¹; blau gibt die Simulation für ausschließlich natürliche, rot die Simulation für einschließlich anthropogener Antriebe an; die schwarze Linie stellt die Entwicklung der beobachteten Temperaturabweichung dar

Klimawissenschaftler folgern entsprechend, dass seit den sechziger (respektive spätestens seit mindestens Ende der 1970er Jahre) eine Änderung der bodennahen, globalen Mitteltemperatur mit maßgeblich natürlichen Einflüssen nicht mehr zu erklären ist. **Nur wenn alle bekannten Einflüsse auf das Klima einschließlich der durch den Menschen verursachten Treibhausgase in der Atmosphäre einbezogen würden, könnte die tatsächlich beobachtete Klimaerwärmung auch von Seiten der Theorie deutlich nachgebildet werden.**

Dieses Ergebnis unterstreicht zusätzlich auch der Vergleich einer grafischen Darstellung von Modellen zur Entwicklung der globalen Mitteltemperatur (=Temperaturabweichung zum Referenzzeitraum 1961-1990), wenn diese nur eine ‚Antwort‘ auf Änderungen der Sonnenaktivität (2.

141 Die dargestellten Temperaturabweichungen beziehen sich auf 1880–1919 für Erdoberflächentemperaturen, 1960–1980 für den Wärmegehalt des Ozeans und 1979–1999 für das Meereis. Alle Zeitreihen sind Zehn-Jahres-Mittel.

Bild), nur eine ‚Antwort‘ auf vulkanische Eruptionen (3. Bild) oder nur eine ‚Antwort‘ auf die interne Klimavariabilität (4. Bild, hier bezogen auf die El-Nino-Southern Oscillation) wäre:



Darstellung der Entwicklung der tatsächlichen globalen Temperaturabweichung (1. Bild) im Vergleich mit Modellen einer Temperaturentwicklung, die nur auf solaren, vulkanischen oder internen Variabilitätsbeeinflussungen beruhen würde (Bilder 2-4) im Gegensatz zur Entwicklung der Temperaturabweichung anhand der Kombination anthropogener Antriebe und kühlender Aerosoleffekte (5. Bild); IPCC (2013, erstellt 2014): Frequently Asked Questions.: 22¹⁴²

142 IPCC (2013, erstellt 2014). Climate Change 2013. The Physical Basis. Working Group I (Technical Support Unit). Frequently Asked Questions.: 22: https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/docs/WG1AR5_FAQbrochure_FINAL.pdf

6.5. Detailliertere Diskussion ausgewählter klimawirksamer Einflüsse

6.5.1. Änderung der Sonnenaktivität

Die Sonnenaktivität ändert sich in sehr langen, mittelfristigen und auch in sehr kurzen Zeiträumen. Zwei Mechanismen kommen dabei grundsätzlich zum Tragen.¹⁴³

Zum einen **dehnt sich die Sonne im Laufe ihrer Existenz aus** und wird immer heißer. Daher nehmen die Leuchtkraft und damit der solare Energiefluss über Milliarden von Jahren stetig zu; vor 3,5 Milliarden Jahren, zum Zeitpunkt der Entwicklung von Leben auf der Erde, soll der solare Energiefluss 35% schwächer gewesen sein als heute.

In erdgeschichtlich kürzeren Zeiträumen sind zum zweiten die **Schwankungen zyklischer Natur** zu sehen, die von Jahrzehnten bis hin zu einigen Jahrtausenden reichen. Zu diesen kommt es, wenn sich die Parameter der Erdbahn um die Sonne ändern und zu Veränderungen der Sonneneinstrahlung an der Erdoberfläche führen. Dabei handelt es sich um ziemlich exakt berechenbare astrophysikalische Parameter. Die dominanten Perioden der Erdbahnzyklen – die sogenannten **Milankovitch-Zyklen** – betragen 23.000, 41.000, 100.000 und 400.000 Jahre. Sie treten in den meisten langen Klimazeitreihen deutlich hervor. Die Milankovitch-Zyklen verursachten nach gegenwärtigen Erkenntnissen die periodisch wiederkehrenden Eiszeiten, die vor zwei bis drei Millionen Jahren begannen. In langen Zeiträumen können Änderungen der Leuchtkraft der Sonne demnach eine große Rolle spielen. Zu den **vergleichsweise kurzen Zyklen, in denen die Sonnenstrahlung schwankt**, zählen unter anderem der 11-Jahreszyklus, der Gleissberg-Zyklus mit 80 bis 90 Jahren, der de Vries oder Suess-Zyklus mit 208 Jahren und der Hallstatt-Zyklus mit 2300 Jahren.¹⁴⁴

Für den **11-Jahreszyklus** liegen direkte Messwerte der Sonnenstrahlung (des solaren Energieflusses) vor. **Seit 1977** wird der **solare Energiefluss kontinuierlich von Satelliten aus gemessen**. Die **Schwankungen des Energieflusses** zwischen dem Maximum und dem Minimum des 11-Jahreszyklus **liegen** – umgerechnet auf die Erdoberfläche – **bei 0,07%**. Das ist ein geringer Wert. Damit ist der solare Energiefluss sehr konstant über die Zeit. Die genannten gemessenen Schwankungen

143 (Vgl.) zu den nachfolgenden Absätzen: UBA (Hrsg.) (2013). Und sie erwärmt sich doch – Was steckt hinter der Debatte um den Klimawandel? Fragen zu den Grundlagen der Klimawissenschaft, die immer wieder gestellt werden. Dessau-Roßlau.: 32-38, 36-38.

144 Zu weitergehenden Informationen zu den zyklischen Schwankungen und zur Verwendung von Messdaten des solaren Energieflusses, zu historischen Sonnenfleckenanzahlbeobachtungen und Proxydatenanwendungen vgl. die S. 6-10: UBA (2012). Sonne, Treibhausgase, Aerosole, Vulkanausbrüche - gibt es einen Favoriten bei Klimaänderungen? Dessau-Roßlau: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/sonne-treibhausgase-aerosole-vulkanausbrueche>, hier finden sich ebenso Informationen zur so genannten „Kleinen Eiszeit“ Ende des 17. Jahrhunderts.
Vgl. zu neueren Forschungsergebnissen zur „Kleinen Eiszeit“ auch Max-Planck-Institut für Meteorologie (2017), Neue Studie: Warum die europäischen Winter während der Kleinen Eiszeit so kalt waren. Artikel vom 30.8.2017: https://www.mpimet.mpg.de/kommunikation/aktuelles/single-news/news/neue-studie-warum-die-europaeischen-winter-waehrend-der-kleinen-eiszeit-so-kalt-waren/?tx_news_pi1%5Bcontrol%5D=News&tx_news_pi1%5Baction%5D=detail&cHash=c5ea9279a7c3c65ba42e16db7cd6e8d1

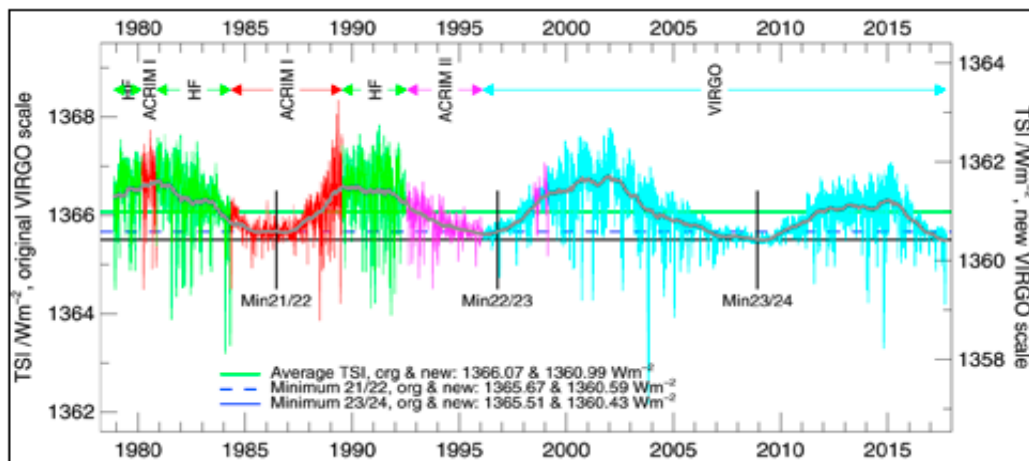
dieser Größenordnung können keinen maßgeblichen Einfluss auf das globale Mittel der bodennahen Lufttemperatur haben, sofern nicht bestimmte Mechanismen der Verstärkung auftreten. Das sind Prozesse in der Atmosphäre, durch die eine Verstärkung der Wirkung einer bestimmten Ursache hervorgerufen wird. Bei dem 11-Jahreszyklus der Sonne müsste die geringe Änderung der globalen Mitteltemperatur infolge einer geringen Änderung des Energieflusses der Sonne durch weitere Prozesse verstärkt werden. In einer Vielzahl von Veröffentlichungen wurde der Einfluss der solaren Schwankung hinsichtlich des 11-Jahreszyklus untersucht. **Hinweise auf einen Verstärkungsmechanismus wurden nicht gesehen** (bzw. können bisher nicht belegt werden) und ein deutlicher Einfluss auf das globale Klima wurde als eher unwahrscheinlich bewertet; regionale Einflüsse wurden bestätigt, wobei diese z.T. sehr schwach ausgeprägt sind und die Ursachenklärung nicht sicher ist.¹⁴⁵

Wie schon in den vorangehenden Kapiteln dargestellt, wird den Veränderungen der Sonnenaktivität im Vierten und Fünften Sachstandsbericht nur ein sehr geringer Einfluss von höchstens 0,1 Watt/ m² Strahlungsantrieb auf die beobachtete zugenommene globale Erwärmung zugesprochen (bei nach 1950 weitgehend konstantem Energiefluss und sogar leicht abnehmender Intensität des 11-Jahreszyklus, s. Abbildung). Von den natürlichen Faktoren, die in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts die Klimaänderungen noch dominierten, hatte die Erhöhung des solaren Energieflusses jedoch den größten Anteil an der globalen Erwärmung. Spätestens ab 1980 kann eine solare Variabilität die Erwärmung nicht mehr erklären¹⁴⁶. Einwände, dass eine **solare Variabilität** ursächlich für die beobachtete Erwärmung sei (die dann eine natürlich bedingte wäre), weil sie nur **zeitlich verzögert** als solare Variabilität noch von vor 1950 wirke, konnten **wissenschaftlich entkräftet** werden. Studien zeigten, dass 60% der Temperaturreaktion innerhalb der ersten 20 Jahre erfolgen müssten. Da aber 80% der seit Beginn der Industrialisierung beobachteten Erwärmung nach 1970 eintraten, könne eine solche Erklärung nicht zutreffend sein. Überdies müssten die Ozeane bei einer solchen Erklärung sonst schon eine stärkere Erwärmung aufweisen; wobei das Gegenteil der Fall sei (die Kontinente erwärmten sich gegenwärtig noch schneller, der Ozean reagiert ‚noch‘ und ‚zieht nach‘).¹⁴⁷

145 Vgl. - z.B. zu den Auswirkungen des 11-Jahreszyklus (insbesondere auf die Stratosphäre und zu Meeresoberflächentemperaturen in einigen Regionen) sowie zum Einfluss der kosmischen Strahlung auf die Bedeckung mit und die Eigenschaften von Wolken - den die Untersuchungen vorstellenden Übersichtsartikel: Gray, L.J. u.a.(2010). Solar influence on Climate. Reviews in Geophysics, 48 RG4001 (1-53): <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2009RG000282/full>

146 S. dazu auch Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung (2009). Der Einfluss der Sonne auf das Erdklima. In: Forschungsinfo 2/2009: <https://www.mps.mpg.de/442697/19Der-Einfluss-der-Sonne-auf-das-Erdklima.pdf>.. S. dazu auch die vorangehend dargestellte gute Erklärbarkeit der beobachtbaren Veränderungen mit den Klimasilulationsmodellen der Klimawissenschaften, wonach vor allem anthropogene Einflüsse für die Klimaänderungen auszumachen sind.

147 Vgl. dazu Rahmstorf, Stefan (2016). Global temperature goes from heat record to heat record, yet the sun is at its dimmest for half a century. (Und : [Record heat despite a cold sun.](http://www.realclimate.org/index.php/archives/2016/11/record-heat-despite-a-cold-sun/#more-19702)) Artikel vom 14.11.2016:<http://www.realclimate.org/index.php/archives/2016/11/record-heat-despite-a-cold-sun/#more-19702>, der dort auch die von wissenschaftlicher Seite entkräfteten Aussagen des Buches „Die kalte Sonne“ der so genannten Klimaskeptiker Fritz Vahrenholdt und Sebastian Lüning einordnet.



Darstellung der satelliten-gemessenen Sonnenstrahlung über die letzten Jahrzehnte und ihr zyklischer Verlauf; WRC Davos¹⁴⁸

Auch gegenwärtig wird die Sonnenaktivität als schwach beschrieben, bei einer sich jedoch verstärkenden Erwärmung. Das „kleine“ solare Minimum von 2008-2010 war sehr niedrig und auch das Maximum (2013-2015) sehr schwach ausgeprägt (s. nochmals Abbildung).

Aktuelle, 2017 veröffentlichte Forschungsergebnisse des Physikalisch-Meteorologischen Observatoriums Davos und des Weltstrahlungszentrums weisen darauf hin, dass **in den nächsten 50 bis 100 Jahren die Chance** besteht, dass mit einer **deutlich verminderten Sonnenaktivität** zu rechnen sein könnte, wenn die Sonne in ein größeres Minimum ginge, was dann einen **merklichen natürlichen (zeitlich begrenzten) Einfluss** von bis zu 0,5°C (Abschwächung) **auf den Klimawandel** bewirken könnte. Weitere Forschungen mit einem neuartigen Radiometer „CLARA“ ab August dieses Jahres sollen in den nächsten Jahren Klarheit bringen. Den Forschern geht es dabei „weniger um die Größenordnung des Einflusses, der in jedem Fall (bei Berücksichtigung unterschiedlicher Szenarien) kleiner als die vom Menschen verursachte Erwärmung“ sein würde, als vielmehr um ein gesichertes Verständnis zur Beurteilung des weiteren Verlaufs der globalen Erwärmung, da man sonst bei einer Abschwächung der Erwärmung in der Analyse „fälschlich auf einen weniger starken Einfluss des Menschen schließen“ könnte, und darum, rechtzeitig von wissenschaftlicher Seite die Öffentlichkeit auf einen solchen möglichen ‚Zusatzeffekt‘ hinzuweisen, der die maßgeblich anthropogen verursachte Erwärmung dann aber keineswegs stoppen oder langfristig mindern noch ihre bisherige Erklärung infragestellen würde.¹⁴⁹

6.5.2. Wasserdampf als Treibhausgas

Bei dem in der Atmosphäre natürlich vorhandenen Treibhauseffekt spielt der Wasserdampf die wichtigste Rolle und verursacht etwa zwei Drittel des natürlichen Treibhauseffekts (.s. Kapitel

148 Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos und World Radiation Center (PMOD/WRC) (2014, 2017). Solar Constant. Construction of a Composite Total Solar Irradiance (TSI) Time Series from 1978 to present: <https://www.pmodwrc.ch/pmod.php?topic=tsi/composite/SolarConstant>

149 Vgl. PMOD/WRC (2017). Annual Report 2016. Davos: https://www.pmodwrc.ch/annual_report/2016_PMOD-WRC_Annual_Report.pdf, zum “Future and Past Solar Influence on the Terrestrial Climate (FUPSOL-2)”-Projekt ab S. 22.

6.1). Beim anthropogenen Treibhauseffekt spielt er hingegen keine direkte Rolle, denn die Wasserdampfkonzentration der Atmosphäre wird durch anthropogene Wasserdampfemissionen nicht signifikant verändert, da zusätzlich in die Atmosphäre eingebrachtes Wasser innerhalb weniger Tage auskondensiert. Denn die **Atmosphäre nimmt – in Abhängigkeit von ihrer Temperatur – nur eine bestimmte Menge an Wasserdampf auf** (so nimmt eine wärmere Atmosphäre mehr Wasserdampf auf als eine kalte).

Dieser Effekt bewirkt aber einen anderen auf den Klimawandel einflussnehmenden Mechanismus: So führen steigende globale Durchschnittstemperaturen zu einem höheren Dampfdruck, also einer stärkeren Verdunstung und damit zu einem zunehmenden atmosphärischen Wasserdampfgehalt, der dann wiederum als Verstärker einer durch Kohlendioxid und andere anthropogene Treibhausgase verursachten Erwärmung wirkt und diese zusätzlich antreibt. Umgekehrt wirkt Wasserdampf auch als Verstärker einer Abkühlung, wie das bei Vereisungen in der Vergangenheit der Fall war. Kühlt sich die Atmosphäre ab, nimmt sie weniger Wasserdampf auf. Die Folge ist ein verringerter Treibhauseffekt, der die anfängliche Abkühlung verstärkt.

Wasserdampf wirkt somit im Wesentlichen als Rückkopplungsglied. Diese **Wasserdampf-Rückkopplung** ist neben der Eis-Albedo-Rückkopplung (s. Kapitel 4.1.3). die **stärkste, positiv wirkende Rückkopplung im globalen Klimageschehen**.¹⁵⁰

6.5.3. Vulkanischer CO₂ -Ausstoß

Insbesondere explosive Vulkanausbrüche haben einen merklichen Einfluss auf das Klima. Ihre Auswurfmasse kann die Stratosphäre – die im Mittel zwischen 10 und 50 km Höhe liegt – oder sogar die darüber liegende Mesosphäre erreichen. Von Bedeutung sind dabei die **Sulfatpartikel**. Sie bilden sich im Verlauf einiger Monate aus den schwefelhaltigen Vulkan-Gasen. Diese Partikel streuen einen Teil der Sonnenstrahlung. Dadurch gelangt weniger Sonnenstrahlung bis zur Erdoberfläche und es resultiert ein **abkühlender Effekt**.

Nach dem Ausbruch des Pinatubo 1991 auf den Philippinen habe der **negative Strahlungsantrieb kurzzeitig Werte von fast 4 W/ m²** erreicht; mit spürbarem abkühlenden Effekt. Im Mittel mehrerer Jahre bleibt der negative vulkanische Strahlungsantrieb jedoch gering. Das heißt, dass die **global gemittelte bodennahe Lufttemperatur nur vorübergehend durch Vulkanausbrüche beeinflusst** wird. So werde dem Ausbruch des Pinatubo ein Rückgang der globalen Mitteltemperatur um etwa 0,2 °C zugeordnet. Vulkanausbrüche führen in der Tendenz zu einer Abkühlung. Diese dauert jedoch beim Ausbruch einzelner Vulkane nur wenige Jahre an.

Zur Bedeutung des vulkanischen CO₂-Gehalts in der Atmosphäre („CO₂ from erupting magma and from degassing of unerupted magma beneath volcanoes“) wird vor allem darauf verwiesen, dass die atmosphärische **CO₂-Konzentration allein in den letzten 10.000 Jahren in etwa** bei

150 Vgl. zu dem gesamten Unterkapitel UBA 2013: 41.

280ppm (+- 10ppm) **konstant** war und Vulkanausbrüche beim CO₂-Gehalt also keinen wesentlichen dauerhaften Effekt verursacht haben können.¹⁵¹

Während die durch den Menschen verursachten CO₂-Emissionen (aus der Nutzung fossiler Energieträger, Waldrodungen, Brennholznutzung, Zementproduktion) im Laufe des Industriezeitalters auf ca. 35 (2013) Milliarden Tonnen jährlich anwachsen, werden die jährlichen vulkanischen CO₂-Emissionen („output of the Earth’s degassing sub-aerial and submarine volcanoes“) dagegen in unterschiedlichen Studien auf etwa 130-440 Millionen Tonnen, im Mittel 150- 260 Millionen Tonnen geschätzt – was weniger als 1% der durch den Menschen verursachten jährlichen CO₂-Emissionen entsprechen würde.. Ein bisher **noch unbekannter Eintrag von CO₂ aus Vulkanen** wird dabei als **unplausibel** beschrieben: „Further, to create more than 35 gigatons [jährliche Gesamt-CO₂-Emissionen 2011] per year of volcanic CO₂ would require that magma across the globe be produced in amounts exceeding 850 cubic kilometers per year, even for magma hypothetically containing 1.5- weight- percent CO₂. It is implausible that this much magma production—more than 40 times the annual mid- ocean ridge magma supply—is going unnoticed, on land or beneath the sea.“¹⁵²

6.5.4. Wirkung von Aerosolen

Neben den Sulfataerosolen aus der Vulkantätigkeit können Aerosole auch durch weitere natürliche Vorgänge wie u.a. Wüstenstürme, Seesalz vom Ozean oder Biosphärenteilchen entstehen. Aber auch bei menschlichen Aktivitäten wie der Verbrennung von Biomasse und fossilen Brennstoffen entstehen Aerosole.

Auch sie beeinflussen das Erdklima. Die Wirkung eines Aerosols auf die Lufttemperatur ist abhängig von seiner Flughöhe in der Atmosphäre. In der untersten Atmosphärenschicht, der Troposphäre, sorgen Rußpartikel für einen Temperaturanstieg, da sie das Sonnenlicht absorbieren und anschließend Wärmestrahlung abgeben. Die verringerte Reflektivität (Albedo) von Schnee- und Eisflächen und anschließend darauf niedergegangenen Rußpartikeln wirkt ebenfalls erwärmend.

In höheren Luftschichten hingegen wirken Mineralpartikel, Sulfate und Nitrate durch ihre abschirmende Wirkung abkühlend.

Auch die Wolkenbildung kann durch Aerosole geändert werden. In diesem Sinne können Aerosole die kurzwellige Solarstrahlung absorbieren oder reflektieren. Auf die langwellige Wärmestrahlung haben sie dagegen fast keinen Einfluss.¹⁵³

151 Vgl. zu den vorangehenden Absätzen UBA (2015). Häufige Fragen zum Klimawandel. Internetseite: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimawandel/haeufige-fragen-klimawandel#textpart-1>

152 Gerlach, Terry (2011). Volcanic Versus Anthropogenic Carbon Dioxide. In: EOS Volume 92, Issue 24: 201: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2011EO240001/abstract;jsessionid=DAD6D1D0042D2D86BD46860AF36DA7AE.f03t03>

153 Vgl. u.a. Warnsignal Klima (2015). Der erhöhte Treibhauseffekt der Atmosphäre: <http://www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de/treibhauseffekt/>

Aerosole liefern von allen festgestellten Beiträgen zum gesamten Strahlungsantrieb laut IPCC die größte Unsicherheit, was vor allem mit ihrem Einfluss auf die Wolkenbildung zusammenhängt. Dennoch ist laut Fünftem Sachstandsbericht das „Vertrauen hoch, dass Aerosole und deren Wechselwirkungen mit Wolken einen wesentlichen Anteil des globalen mittleren Antriebs durch gut gemischte Treibhausgase kompensiert haben“¹⁵⁴, dass sie also wesentlich zur Abmilderung der Erwärmung geführt haben. So wird den Aerosolen in der Summe insgesamt eine deutlich abkühlende Wirkung zugemessen.

6.5.5. Rolle von Wärmeinseln

Bei vielen Herstellungs- oder Gebrauchsprozessen wird Abwärme produziert, wie bei der Produktion von elektrischem Strom, der Nutzung von Verbrennungsmotoren, dem Betrieb von Computern. Dabei entsteht in urbanen Räumen ein so genannter **lokal begrenzter „Wärmeineleffekt“**. Verursacht wird der Effekt durch erhöhtes Wärmespeichervermögen (in dichter Bebauung und der Erzeugung der genannten Abwärme), geringere Verdunstung und Heiztätigkeit in Städten.

Der **Einfluss auf die globale Mitteltemperatur** beträgt laut Viertem IPCC-Sachstandsbericht **weniger als 0,006°C über Land** und Null über den Ozeanen. Auch im Fünften Sachstandsbericht ist festgehalten, dass Wärmeineleffekte einen langjährigen Temperaturtrend nur in geringem Maße beeinflussen können.¹⁵⁵

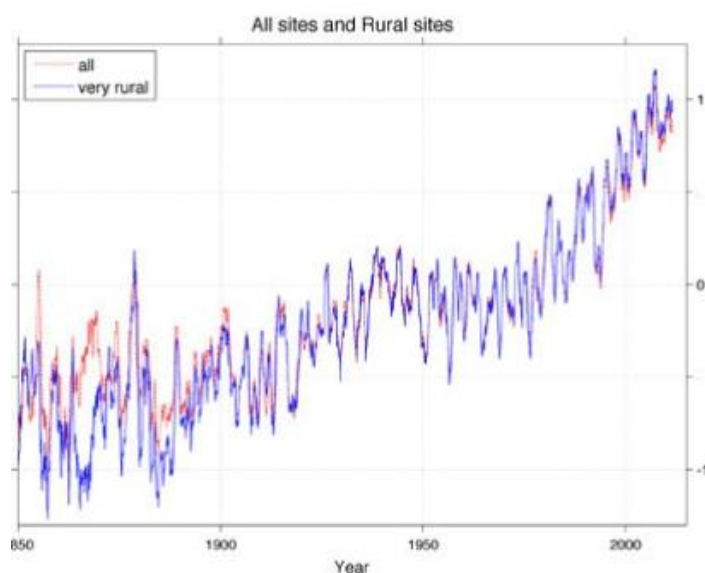
Hingewiesen wird von klimawissenschaftlicher Seite zudem, dass eine ‚Vortäuschung‘ oder eine ‚Verfälschung‘ der Daten zur Erhöhung der gemessenen globalen Mitteltemperatur (wie schon im Kapitel 4.1.1.2 erwähnt) durch die Wärmeineleffekte über die Messverfahren ausgeschlossen wird, da die Messungen der Lufttemperatur nicht nur in Städten, sondern auch in ländlichen Regionen, in Gebirgen oder auf Inseln erfolgen.¹⁵⁶ Wichtig für die Beurteilung der Frage, ob es eine Verzerrung der Erhebungen zur Temperaturabweichung gibt, sei zudem weniger die absolute Temperaturabweichung über Städten, sondern vielmehr, ob es einen Unterschied zwischen den Temperaturveränderungen in urbanen und in ländlichen Gebieten gibt. Dabei wurde in Studien festgestellt, dass zwar ein Unterschied bei den Temperaturtrends zwischen ideal gelegenen länd-

154 IPCC 2014 (Übersetzung 2016). Synthesebericht: 44: http://www.de-ipcc.de/media/content/IPCC-AR5_SYR_barrierefrei.pdf

155 Vgl. IPCC 2013 (Kapitel 2.4.1.3) zitiert nach UBA 2015.

156 Vgl. UBA 2015.

lichen Messstationen und solchen in Städten existiert und dieser lokal oder regional auch bedeutend sein kann. Allerdings habe dies auf großräumige oder globale Trends der Erderwärmung praktisch keinen Einfluss.¹⁵⁷ Der Verlauf der Erwärmung ist gleich (s. Abbildung).



Unterschied zwischen Temperaturdaten „sehr ländlicher“ (lila) und aller (rot) Messstationen des Berkeley-Earth-Projekts (dargestellt als Abweichung vom Mittelwert 1950-1980), Wickham 2013¹⁵⁸

7. Einordnung der Breite des Konsenses zum anthropogen verursachten Klimawandel in der klimawissenschaftlichen Literatur

In der Wissenschaft selbst gibt es schon lange einen sehr breiten Konsens, dass eine globale Erwärmung stattfindet und der Mensch der maßgebliche Faktor hierfür ist.¹⁵⁹

157 Vgl. Cook, J. (2015). Der Einfluss von Städten auf Temperaturdaten wird oft überschätzt, der Erwärmungstrend unterscheidet sich in urbanen und ländlichen Gebieten kaum. Auf: Klimafakten.de <https://www.klimafakten.de/behauptungen/behauptung-waermeinseln-staedten-verfaelschen-klimatrends>
Klimafakten.de hat einen wissenschaftlichen Beirat 20 renommierter und bekannter deutscher Klimawissenschaftler; Klimafakten.de ist gleichzeitig Partnerwebsite von ScepticalScience von John Cook; die wiederum als weltweit bekannteste wissenschaftsbasierte Website zur globalen Erwärmung und seiner ‚Leugnung‘ gilt; sie ist 2016 vom US-amerikanischen „National Center for Science Education“ ausgezeichnet worden, einer Vereinigung international anerkannter US-Wissenschaftler, u.a. mit James Hansen im Beirat, die für die wissenschaftsbasierte Unterrichtung der Themen Evolution und Klimawandel eintritt.

158 Wickham, C. u.a. (2013). Influence of Urban Heating on the Global Temperature Land Average using Rural Sites Identified from MODIS Classifications. In: Geoinformatics and Geostatistics: An Overview Vol: 1 Issue: 2: https://www.scitechnol.com/influence-urban-heating-global-temperature-land-average-using-rural-sites-identified-from-modis-classifications-vwBQ.php?article_id=588

159 Vgl. UBA 2013: 93.

7.1. Nachweis über so genannte „Consensus“ Studien

Dieser in der Wissenschaft bestehende Konsens wurde über unterschiedliche Studien im Laufe der Jahre dargestellt. Die Studie von **Naomi Oreskes**¹⁶⁰ (Professorin für Geschichte und Wissenschaftsforschung an der Universität San Diego) zum „Scientific Consensus on Climate Change“ aus dem Jahr 2004 gilt als Ausgangspunkt zum Nachweis der diesbezüglichen weitgehenden Einigkeit der wissenschaftlichen Gemeinschaft. Oreskes untersuchte alle 928 Abstracts peer-reviewter Veröffentlichungen zum Stichwort „Globale Klimaänderung“, die zwischen 1993 bis 2003 in Fachzeitschriften erschienen waren. In keiner dieser Veröffentlichungen sei der Erkenntnis von der anthropogenen – durch den Menschen verursachten – Klimaerwärmung widersprochen worden. Drei Viertel der Studien stützten den Konsens, ein Viertel hätte keine Aussage dazu gemacht (z.B. auch, weil sie sich mit methodischen oder erdgeschichtlichen Fragen befassen).

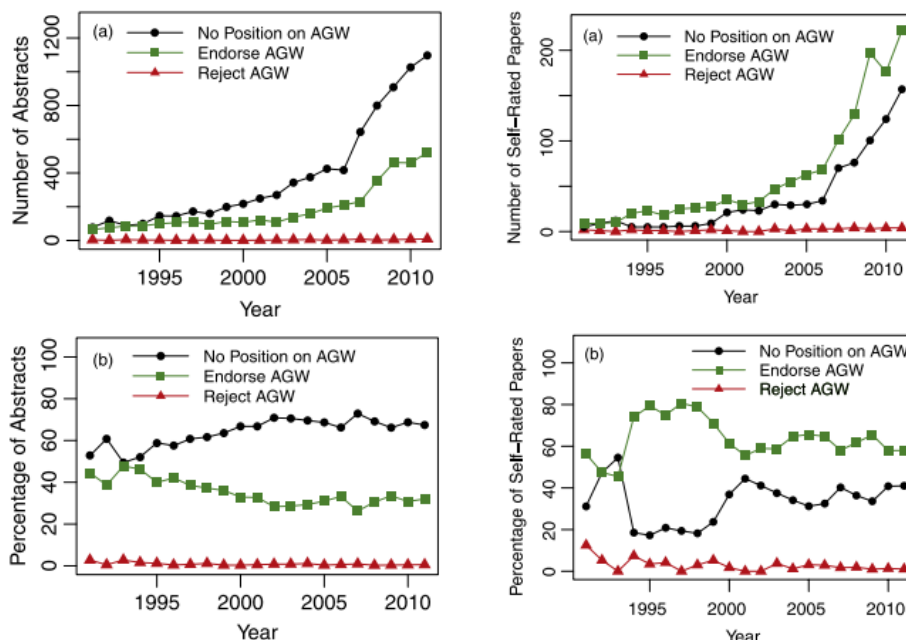
Auch **Anderegg u.a.** untersuchten 2010 anhand von Publikationen und schriftlichen Stellungnahmen die Positionen von knapp 1.400 Klimaforschern und veröffentlichten ihre Ergebnisse in der Fachzeitschrift der Akademie der Wissenschaften der USA („Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America“, PNAS). Die Autoren konstatieren darin, dass **97 bis 98%** der aktiv in Fachzeitschriften publizierenden Klimaforscher mit der grundlegenden Aussage des IPCC übereinstimmen, dass die durch den Menschen verursachten Treibhausgase für den größten Teil des zweifelsfrei erwiesenen Anstiegs der bodennahen globalen Mitteltemperatur seit der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts verantwortlich seien. In der Unterscheidung der Zustimmung nach vorhandener Fachexpertise (Anzahl der Veröffentlichungen und Zitationen) hätten die dem Konsens nicht zustimmenden Wissenschaftler zudem eine deutlich geringere Expertise aufgewiesen.¹⁶¹

Cook u.a. untersuchten insgesamt knapp **12.000 Abstracts klimawandelbezogener peer-reviewter wissenschaftlicher Literatur**, die **zwischen 1991 und 2011 veröffentlicht** wurde, hinsichtlich eines Konsenses zum anthropogenen Klimawandel (AGW). Dabei wurde in gut 66% der Abstracts keine Position zum AGW ausgedrückt. In den sich **(im Abstract) positionierenden Veröffentlichungen** stimmten **97,1%** dem AGW und der Position, dass Menschen die globale Erwärmung verursachen, zu. In einer zweiten Stufe wurden Autoren eingeladen, ihre eigenen Papiere zu dem Thema AGW einzuordnen: Unter den „**self-rated papers**“ wird die Zustimmungsrate zur Position des AGW mit **97,2 %** angegeben. „For both abstract ratings and authors' self-ratings, the percentage of endorsements among papers expressing a position on AGW marginally increased over time. Our analysis indicates that the number of papers rejecting the consensus on AGW is a vanishingly small proportion of the published research.“¹⁶²

160 Vgl. Oreskes, Naomi (2004). The Scientific Consensus on Climate Change. In: Science. Vol. 306, Issue 5702 (1686): <http://science.sciencemag.org/content/306/5702/1686.full>

161 Vgl. Anderegg, William R. u.a. (2010). Expert credibility in climate change. In: Proceedings of the National Academy of Sciences. Vol. 107, No. 27 (12107–12109): <http://www.pnas.org/content/107/27/12107.full>

162 Vgl. Cook, John u.a. (2013). Quantifying the consensus on anthropogenic global warming in the scientific literature. In: Environmental Research Letters. No 8: Abstract: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/8/2/024024/pdf>



Cook u.a. 2013: 4

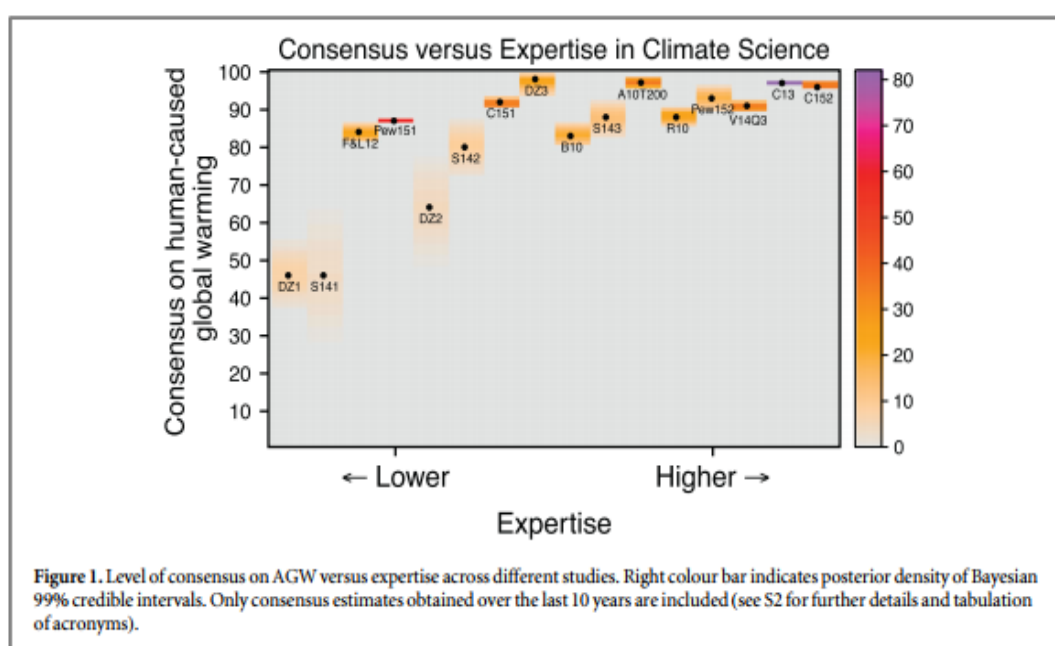
Doran und Zimmermann führten 2009 eine Umfrage unter Geologen zum Konsens in den Hauptaussagen der Klimawandeldiskussion durch (10.000 Anfragen bei einem Rücklauf von 30,7%; 90% Forscher an US-Institutionen). Dabei wurde zum einen nach der Einschätzung zur Änderung der globalen Erdtemperatur gefragt (gestiegen, gesunken, relativ konstant zu vorindustriellem Niveau) und zum anderen nach dem entscheidenden Einfluss menschlicher Aktivitäten bei der Veränderung der globalen Mitteltemperatur. 90% aller antworteten, dass sie von dem Anstieg der globalen Mitteltemperatur ausgehen/überzeugt sind, 82% aller Antwortenden gingen vom entscheidenden Einfluss menschlicher Aktivitäten auf die Temperaturänderung aus. Die am meisten **spezialisierten und fachlich kompetentesten antwortenden Geologen** im Hinblick auf Fragen der Klimaforschung (solche, die Klimaforschung als ihr Fachgebiet angegeben haben und mehr als 50% ihrer peer-reviewten Papiere in den letzten Jahren zum Themengebiet veröffentlicht hatten), gaben nach Cook u.a. zu **97,4%** an, einem entscheidenden menschlichen Einfluss zuzustimmen (ja). Von den Geologen, die keine Klimatologen waren und nicht einschlägige Forschungsarbeiten zu Klimafragen verfasst haben, antworteten 77% mit „ja“. Geologen, die in der Privatwirtschaft arbeiteten, hätte die Frage zu 47% bejaht.¹⁶³

2016 legten **Cook, Orekes, Andregg u.a.** (alle vorher schon zum „Consensus“ publizierenden Forscher wie z.B. auch der schon angeführte Peter Doran 2009, aber auch Stuart Carlton 2015 mit 97% festgestelltem Konsensus oder Bart Verheggen mit 91% festgestelltem Konsensus 2014)¹⁶⁴ nach vereinzelter Kritik methodischer Art (von wissenschaftlicher Seite vor allem von Richard Tol) an ihren jeweils unterschiedlichen Arbeiten eine Metastudie zur Konsens-Forschung vor. In

163 Vgl. Doran, Peter; Zimmerman, Marrie Kendall (2009) Examining the scientific consensus on climate change. In: Eos. Vol. 90, Issue 3 (22–23): <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2009EO030002/abstract>

164 Vgl. Cook, Orekes; Andregg u.a. (2016). Consensus on consensus: a synthesis of consensus estimates on human-caused global warming. In: Environmental Research Letters, Vol. 11, No 4: Abstract: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/11/4/048002>

der Zusammenfassung ihrer Arbeiten ergäben sich **durchgehend Konsensraten von 90-100%** („the consensus that humans are causing recent global warming is shared by 90%–100% of publishing climate scientists according to six independent studies“). Dabei würde die Konsensrate sogar deutlich näher **an 100%** steigen (s. Abbildung), je höher die Fachkompetenz und die Aktivität der Autoren in der Klimaforschung wäre (gemessen an der Anzahl der begutachteten Veröffentlichungen in anerkannten Fachjournalen), benannt als so genannte „**high scientists**“. Zusammenfassend wird festgestellt: „We examine the available studies and conclude that the finding of 97% consensus in published climate research is robust and consistent with other surveys of climate scientists and peer-reviewed studies.“¹⁶⁵.



Cook, Orekes; Andregg u.a. (2016):
6

2014 hat die ‘**American Association for the Advancement of Science (AAAS)**’, die weltweit größte Wissenschaftsvereinigung und Herausgeber der Fachjournale der Science-Familie, die Initiative “WhatWeKnow” gestartet, um das Faktum der **weitgehenden wissenschaftlichen Einigkeit zu bestätigen** („about 97% of climate experts have concluded that human-caused climate change is happening“) und stärker in die Öffentlichkeit zu tragen („the scientific community is not divided [- although „that many Americans still erroneously believe that“] on the issue“).¹⁶⁶

165 Vgl. Cook, Orekes; Andregg u.a. (2016). Consensus on consensus: a synthesis of consensus estimates on human-caused global warming. In: Environmental Research Letters, Vol. 11, No 4: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/11/4/048002>

166 (Vgl.) American Association for the Advancement of Science (AAAS). (2014). WhatWeKnow-Initiative: <http://whatweknow.aaas.org/about-the-initiative/>, um sicherzustellen, “that three “R’s” of climate change communicated to the public.”

7.2. Wahrnehmung des Konsenses in der Öffentlichkeit

Trotz dieser weitgehenden Einigkeit der Wissenschaft in der Frage zur Existenz und zur Hauptursache des Klimawandels stellen zahlreiche Umfragen und Forschungsarbeiten (wie von der AAAS auch aufgegriffen) immer wieder fest, dass zu diesem Umstand ein „weitverbreitetes öffentliches Missverständnis“ bestehe¹⁶⁷. So werde fälschlicherweise angenommen, dass es eine (z.T. erhebliche) Uneinigkeit der Wissenschaft zu Klimawandel und Hauptursache der globalen Erwärmung gebe.

In den USA stimmten beispielsweise 2004 50 % der Befragten der Aussage zu, dass Wissenschaftler uneins bezüglich einer Existenz des Klimawandels wären¹⁶⁸. Eine Untersuchung aus dem Jahr 2012 weist 43% der befragten US-Bürger als davon ausgehend aus, dass die Wissenschaft uneins über die globale Erwärmung auf Grund menschlicher Aktivitäten sei, bei republikanischen Anhängern sind es 57%.¹⁶⁹

The Pew Research Center (2012): 3

Public Divided over Scientific Consensus on Warming

<i>Do scientists agree earth is getting warmer because of human activity?</i>	Total	Rep	Dem	Ind
	%	%	%	%
Yes	45	30	58	45
No	43	57	32	45
Don't know	12	13	10	10
	100	100	100	100

Auch in der aktuellsten vorliegenden Umfrage zum Wissen um dem Konsens der Wissenschaft werden 10% der US-Bürger angegeben als diejenigen, die glauben, dass die meisten wissenschaftlichen Studien den Klimawandel insgesamt sogar nicht bestätigen würden („that climate change is not real“) und 26%, die glauben, dass es zumindest keinen Konsens gäbe und die meisten wissenschaftlichen Studien eher uneinig seien (bei den republikanischen Anhängern werden dazu 42% angegeben, die von keinem Konsens in der Wissenschaft und eher Uneinigkeit ausge-

167 “... a widespread public misunderstanding about the degree of scientific consensus on human-caused climate change.” van der Linden, Sander u.a. (2015). The Scientific Consensus on Climate Change as a Gateway Belief: Experimental Evidence. In: PLoS One. 2015, 10(2): Abstract: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4340922/>

168 Nisbet, Matthew; Myers, Teresa (2007). The Polls—Trends: Twenty Years of Public Opinion about Global Warming. In: Public Opinion Quarterly. Vol. 71, Issue 3 (444–470): <https://academic.oup.com/poq/article/71/3/444/1858123/The-Polls-TrendsTwenty-Years-of-Public-Opinion>

169 The Pew Research Center (2012). More Say There is Solid Evidence of Global Warming. Washington, DC: <http://www.people-press.org/files/legacy-pdf/10-15-12%20Global%20Warming%20Release.pdf>

hen, weitere 12% würden von einer mehrheitlich deutlichen Ablehnung der Wissenschaft ausgehen, dass der Klimawandel nicht real sei. (Nur eine Zuordnung zu den drei Aussagen war möglich – s. Abbildung).¹⁷⁰

60 Minutes/Vanity Fair Poll. March 30-April 3, 2016. N=1,010 adults nationwide. Margin of error \pm 4.

PollingReport; Zusammenstellung aller landesweiten US-Umfragen

"As far as you know, what do scientific studies conclude about global warming? Most scientific studies conclude that global warming is real. Most scientific studies conclude that global warming is not real. OR, Most scientific studies are divided, and there is no real **consensus** either way."

	Real %	Not real %	No real consensus %	Unsure/ No answer %
ALL	61	10	26	2
Republicans	39	18	42	1
Democrats	78	6	13	3
Independents	60	10	28	3

Für **Deutschland** wurde jüngst erhoben, dass 83% der Deutschen davon ausgehen, dass es einen Klimawandel gibt, während 16% davon nicht überzeugt sind (in Großbritannien sind 12% nicht überzeugt, in Frankreich 6% und in Norwegen 4%). Dabei gaben zusammenfassend **ca. 30%** der Befragten an, dass sie davon ausgehen, dass sich nur die **Hälfte oder noch weniger der Wissenschaft** hinsichtlich der Existenz und anthropogenen Hauptursache des Klimawandels **einig** sei¹⁷¹: Im Einzelnen ging jeder vierte der Befragten von der (= tatsächlichen) weitgehenden (zu mehr als 80%) Übereinstimmung der Klimaforscher aus, 30% glaubten, dass sich zwischen 50 bis 80% der Forscher darin einig seien, 19% glauben, dass sich Einigkeit und Uneinigkeit dazu in der Forschung in etwa die Waage hielten (50% zu 50%), 6% glaubten, dass die Einigkeit dazu in der Wissenschaft zu weniger als der Hälfte bestehe und 4% meinten, dass weniger als 20% der Forscher sich einig seien, 13% machten keine Angaben.¹⁷²

Hervorgehoben wird in einigen Studien auch die Bedeutung, die dieses „lack of perception of the scientific consensus“ für die eigene Urteilsbildung habe. So steige die Überzeugung zur Existenz und Akzeptanz des Klimawandels, wenn der diesbezügliche Konsens der Wissenschaftsgemeinschaft bekannt ist.¹⁷³

170 PollingReport (2017, hier 2016). Zusammenstellung aller landesweiten US-Umfragen: <http://www.pollingreport.com/enviro.htm>

171 In den anderen untersuchten Ländern sind die ‚Unwissenheitsraten‘ etwas weniger hoch.

172 Vgl. Cardiff University (Hrsg.) (2017). European Perceptions of Climate Change (EPCC). Topline findings of a survey conducted in four European countries in 2016. March 2017: 18, 22: <https://orca.cf.ac.uk/98660/7/EPCC.pdf>

173 Vgl. dazu z.B. Lewandowsky, S. u.a. (2013). The pivotal role of perceived scientific consensus in acceptance of science. Nature Climate Change 3 (399–404): <http://www.nature.com/nclimate/journal/v3/n4/abs/nclimate1720.html?foxtrotcallback=true>

7.3. Erklärungsansätze zur Diskrepanz der Wahrnehmung

Zur Erklärung des Zustandekommens dieser irrtümlichen Wahrnehmung eines fehlenden wissenschaftlichen Konsenses werden hauptsächlich zwei Zugänge gewählt: die Untersuchung der Rolle von Einflussgruppen wie Denkfabriken und zur Rolle von Medien.

Dabei liegt eine Vielzahl von Untersuchungen zur Rolle der als konservativ geltenden Think Tanks (CTT) vor allem in den USA vor, für die ein bedeutender Einfluss im Zusammenhang mit der gezielten Äußerung von Zweifeln am wissenschaftlichen Konsens und der Verbreitung von vermeintlich bestehender wissenschaftlicher Uneinigkeit zum Klimawandel und seiner Hauptursache nachgewiesen werden kann.¹⁷⁴

Zudem gibt es eine Vielzahl wissenschaftlicher Untersuchungen zur Rolle von Medien und Journalismus im Zusammenhang mit der Darstellung einer vermeintlich bestehenden Uneinigkeit innerhalb der Klimawissenschaften zum anthropogenen Klimawandel oder mit einer Infragestellung seines Anerkenntnisses. So konstatieren die Studien, dass **gegensätzlichen Ansichten** - die dabei häufig in den Kommentarspalten oder in Namensartikeln zu finden sind, (dabei) zumeist als ‚zusätzliche‘ Meinungsäußerung von PolitikerInnen, fachfremden bzw. nicht in Fachzeit-

174 Sich kritisch (zum Konsens) äuernde Publikationen würden von Think Tanks nicht über Peer-Review-Verfahren der anerkannten Fachzeitschriften (stattdessen über Blogs, Zeitungsbeiträge, Policy-Briefe konservativer Think Tanks = „CTTs“ und Bücher) in die Öffentlichkeit gebracht. Laut wissenschaftlichen Untersuchungen von Dunlap/Jaques können klima(wandel)skeptische publizierte Bücher in der übergroßen Mehrheit ganz oder teilweise konservativen Think-Tanks zugeordnet werden („via publication by a CTT press or a verifiable connection between author or editor and CTT, or both“). Nach Jaques u.a. äußern sich 90% der sich zu Umweltthemen äuernden konservativen US-Think Tanks umwelt-/klima-„skeptisch“.

Vgl. Dunlap, Riley E / Jacques, Peter (2013). Climate Change Denial Books and Conservative Think Tanks. Exploring the Connection. In: American Behavioral Scientist. 57(6) (699–731): <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3787818/>; vgl. Jacques, Peter J. u.a. (2008). The organisation of denial: Conservative think tanks and environmental scepticism". In: Environmental Politics. 17 (3) (349–385): <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09644010802055576>; vgl. zur Rolle der Think Tanks in Europa in diesem Zusammenhang Xifra, Jordi (2015). Climate Change Deniers and Advocacy. In: American Behavioral Scientist. Vol. 60, No. 3 (276-287): <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0002764215613403>

schriften veröffentlichenden (damit nicht von anderen der Fachwelt begutachteten) Wissenschaftlern oder manchmal auch von Interessensvertretern geäußert werden¹⁷⁵ - **in den Medien immer wieder ein Forum** gegeben und so der **Eindruck eines fehlendes internationalen wissenschaftlichen Konsenses erzeugt** bzw. verfestigt werde. Dies geschehe von journalistischer Seite häufig, um eine **vermeintliche journalistische Objektivität über die balancierte/ausgewogene Darstellung**¹⁷⁶ eines Themas herzustellen, ein Sowohl-als-Auch. Allerdings verzerre dieses Vorgehen in dem gleichwertigen Gegenüberstellen von Zustimmung und Negierung/Zweifel oder der alleinigen Darstellung der Skepsis/Leugnung¹⁷⁷ die Abbildung der wissenschaftlichen Realität zur Übereinstimmung des Umstandes eines anthropogenen Klimawandels und lasse geäußerte Einzel- oder Sondermeinungen gegenüber der Einigkeit in der Wissenschaft nicht als solche erkennbar werden. Der falsche Eindruck eines Disputs in den Klimawissenschaften werde erzeugt; häufig werde dieser zudem als offene Debatte zwischen so genannten „warners“ und „sceptics“ dargestellt.¹⁷⁸

-
- 175 Painter stellt in einer Analyse von 3.000 Zeitungsartikeln jeweils zweier Zeitungen aus Brasilien, China, Frankreich, Indien, dem Vereinigten Königreich (UK) und den USA im Jahr 2007 und 2009/2010 heraus, dass wiedergegebene klimaskeptische Positionen zu einem Drittel von PolitikerInnen und nur zu einem Fünftel von Wissenschaftlern stammten (in den USA und UK war die Wahrscheinlichkeit dazu noch ausgeprägter als in den anderen Ländern). Dabei kamen häufig wiederkehrend bestimmte Wissenschaftler, die einem bestimmten Think Tank zugeordnet werden konnten (für UK z.B. Global Warming Policy Foundation), zu Wort. Mehr als 40% der Artikel mit klimaskeptischen Stimmen fand sich auf Meinungsseiten und als Editorial. Vgl. Painter, James (Reuters Institute for the Study of Journalism, University of Oxford) (2011). Poles Apart: The international reporting of climate scepticism. Oxford: <http://reutersinstitute.politics.ox.ac.uk/sites/default/files/research/files/Poles%20Apart%20the%20international%20reporting%20of%20climate%20scepticism.pdf>; vgl. auch Elsasser, Shaun/ Dunlap, Riley (2013). Leading Leading Voices in the Denier Choir: Conservative Columnists' Dismissal of Global Warming and Denigration of Climate Science. In: American Behavioral Scientist. Vol. 57, No 6: <http://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/0002764212469800> , die vor allem kritische Klima(Konsens)Äußerungen in Meinungsbeiträgen konservativer US-amerikanischer Kolumnisten feststellten.
- 176 Wobei die hier aufgeführten Studien auch eine deutlich verstärkte Darstellung klimaskeptischer Positionen für eher rechts- als linksgerichtete Medien vor allem für die USA und Großbritannien ausmachen. Vgl. z.B. Painter.
- 177 Zum Begriff des „Klimaskeptizismus“/der „Klima(wandel)leugnung“: In der wissenschaftlichen Debatte wird unterschieden zwischen „trend sceptics/deniers“, die den Umstand der globalen Erwärmung bezweifeln, z.T. mit dem Hinweis auf unzulängliche Messverfahren oder Urbanisierungs- und Wärmeinseleffekte; „attribution sceptics/deniers“, die nicht die Erwärmung, aber ihre wissenschaftliche Zuordnung als hauptsächlich menschliche Verursachung bezweifeln oder aber das CO₂ nicht menschlichen Quellen zuordnen oder aber die Bedeutung zusätzlichen CO₂s für den Treibhauseffekt in Frage stellen; sowie „impact sceptics/deniers“, die die Folgen der globalen Erwärmung als harmlos oder nützlich beschreiben. Vgl. Rahmstorf, Stefan (2004). The climate sceptics: http://www.pik-potsdam.de/~stefan/Publications/Other/rahmstorf_climate_sceptics_2004.pdf
- 178 Vgl. dazu als eine der jüngsten Studien: Brüggemann, Michael; Engesser, Sven (2017). Beyond false balance: How interpretive journalism shapes media coverage of climate change. In: Global Environmental Change. Vol. 42, January 2017 (58-67): <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378016305209>; sowie Boykoff, Maxwell T./ Boykoff, Jules M. (2004). Balance as bias: global warming and the US prestige press. In: Global Environmental Change. 14 (125-136): <http://www.eci.ox.ac.uk/publications/downloads/boykoff04-gec.pdf> , wonach für über 50% der untersuchten Artikel zum Klimathema in der US-Qualitätspresse eine `gemischte` Darstellung von wissenschaftlich weitgehend konsensuierten und Skeptiker-Argumenten festgestellt wurde, was eine signifikante Divergenz zwischen öffentlichem und wissenschaftlichen Diskurs darstelle. Vgl. zur US-Fernsehberichterstattung auch: Boykoff, Maxwell T. (2008). Lost in translation? United States television news coverage of anthropogenic climate change, 1995–2004. In: Climatic Change. Vol. 86, No 1-2: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-007-9299-3>

Exkurs

Eine inhaltliche Erörterung, Einordnung und direkte Entgegnung von klimawissenschaftlicher Seite zu Einwänden und weiteren Vorwürfen der „Klima(wandel)skeptiker“ kann (hier) nicht geleistet werden, es sei daher auf die Literaturangaben in der Fußnote verwiesen¹⁷⁹.

8. Fazit: Rollenverteilung von Wissenschaft und Politik

In Bezug auf den IPCC ist die Rollenverteilung zwischen der Wissenschaft (Auswertung der vorhandenen Fachliteratur) und der Politik (Entscheidungsfindung auf Grundlage der Sachstandsberichte) klar geregelt.¹⁸⁰

Die Klimawissenschaft schafft mit ihren Beobachtungen, Messungen und Simulationen die Grundlagen des Wissens um den Klimawandel, seinen Vollzug und seine Auswirkungen. Das ist deswegen bedeutsam, weil der Klimawandel mit menschlichen Sinnen schlecht wahrnehmbar und seine Komplexität zum Einordnen und Begreifen außerordentliches Fachwissen erfordert.

Klimawissenschaftler selbst weisen darauf hin, dass dabei ihre Forschung, wie jede andere Wissenschaft auch, den Anforderungen an gute Wissenschaft genügen muss: z.B. in der Transparenz der Methode, der Evidenzbasiertheit, der Wiederholbarkeit oder der unabhängigen Überprüfung. Zwar sei Wissenschaft damit nicht gegen Irrtümer gefeit, das Wissenschaftssystem auf diese Weise jedoch auf Selbstkorrektur angelegt (so dass sich „Wahrheiten“ durchsetzen würden).

Unbenommen der bisherigen Erkenntnisse verweisen Klimawissenschaftler darauf, dass es insgesamt noch viel Forschungsarbeit brauche, um noch genauere Modelle, noch umfangreichere Messreihen, ein noch besseres Verständnis zu Klimaprozessen und auch Verknüpfungen sowie vor allem zur Beantwortung von Fragen zu Folgen und Auswirkungen zu erhalten.

Die Entscheidung zu den Konsequenzen aus dem gegenwärtig bereitgestellten Wissen aus der Klimaforschung und zu den Herausforderungen, die der Klimawandel bedeutet, kann nur der Politik obliegen.

179 Der renommierte und international anerkannte Klimawissenschaftler Prof. Stefan Rahmstorf geht auf vorgebrachte Einwände zur Existenz des Klimawandels und zu Behauptungen anderer maßgeblicher Treiber als den anthropogenen immer wieder auf seinem Wissenschaftsblog ausführlich ein, auf dem auch andere anerkannte Klimawissenschaftler mit Gastbeiträgen schreiben: Vgl. Rahmstorf, Stefan (2017). KlimaLounge. Nah dran am Wandel: <https://scilogs.spektrum.de/klimalounge/> Einen ersten Einblick der Kritik von Klimawissenschaftlern an (bewussten) Falschinterpretationen und den den ‚Regeln guter wissenschaftlicher Praxis‘ widersprechenden Instrumentalisierungen vorhandener Klimapublikationen durch Klima(wandel)skeptiker gibt z.B.: Staud, Toralf (2012). Forscher fühlen sich von Klimaskeptiker Vahrenholt instrumentalisiert. Die Zeit vom 10.8.2012: <http://www.zeit.de/wissen/umwelt/2012-08/klimaforscher-vahrenholt-kritik>; vgl. auch die von mehreren anerkannten Klimawissenschaftlern (wie u.a. dem Direktor des Climate System Research Centers der University of Massachusetts) betriebene Erklärungs- und Kommentar-Website: <http://www.realclimate.org/index.php/archives/2004/12/index/#Responses>

180 „Der IPCC bietet Grundlagen für wissenschaftsbasierte Entscheidung der Politik, ohne jedoch konkrete Lösungswege vorzuschlagen oder politische Handlungsempfehlungen zu geben.“ IPCC (o.J.). KompaktInfo: 1.

Denn jeder Beurteilung von Gefahren und Risiken des Klimawandels, aber auch den möglichen Vermeidungsoptionen sind immer Wertentscheidungen immanent - und diese sollten bestenfalls auch demokratisch legitimiert und politisch getroffen werden. So müssen mögliche Folgen (z.B. in Fragen der globalen sozialen Gerechtigkeit, der Gesundheit, der Land- und Forstwirtschaft) etwa gegen Kosten abgewogen werden. Gleichzeitig dürfe „die Festlegung klimapolitischer Ziele aber auch nicht willkürlich sein: Sie muss sich rational rechtfertigen lassen und zugleich den Unsicherheiten wissenschaftlicher Erkenntnis Rechnung tragen.“¹⁸¹ Was bedeutet, auch mit einzubeziehen, dass die Klimawissenschaft nicht exakt bestimmen kann, wann z.B. bestimmte Ereignisse eintreten oder ab welcher Temperaturerwärmungsgrenze bestimmte, gefährliche Kippunkte für Teilsysteme im Klimasystem, die z.B. beim Abschmelzen ganzer Eisschilde oder beim Auftauen des Permafrostes den Klimawandel selbst noch verstärken würden, erreicht sind.

Eine mögliche politische Antwort könnte sein, die Wahrscheinlichkeit senken zu wollen, dass irreversible, großskalige Risiken eintreten. Das Pariser Abkommen basiert auf der Annahme der Wissenschaft, dass bei unter Zwei-Grad-Erwärmungszunahme gegenüber vorindustriellem Niveau dieses Risiko wahrscheinlich begrenzt bleibt.

* * *

181 Edenhofer, Ottmar; Kader, Susanne; Minx, Jan (2015). Ist das Zwei-Grad-Ziel wünschenswert und ist es noch erreichbar? Der Beitrag der Wissenschaft zu einer politischen Debatte. In: Max-Planck-Gesellschaft (Hrsg.). Die Zukunft des Klimas. Neue Erkenntnisse, neue Herausforderungen (69-92): 70.

9. Verwendete Literatur

Alfred-Wegener-Institut (2017). Lasst uns über Meereis sprechen. Interview mit Dr. Marcel Nicolaus vom 21.02.2017: <https://www.awi.de/im-fokus/meereis/artikel/podcast-zur-meereisforschung.html>

American Association for the Advancement of Science (AAAS). (2014). WhatWeKnow-Initiative: <http://whatweknow.aaas.org/about-the-initiative/>

Anderegg, William R. u.a. (2010). Expert credibility in climate change. In: Proceedings of the National Academy of Sciences. Vol. 107, No 27 (12107–12109): <http://www.pnas.org/content/107/27/12107.full>

ARGO Weltmeere-Beobachtungssystem (2017). Part of the integrated global observation strategy: <http://www.argo.ucsd.edu/index.html>

Berliner Kreis e.V. (2017). Klima- und energiepolitische Positionen. Papier vom 30.5.2017: <http://berliner-kreis.info/wp-content/uploads/2017/05/2017-05-30-Klima-und-energiepolitische-Forderungen-1.pdf>

Boykoff, Maxwell T. (2008). Lost in translation? United States television news coverage of anthropogenic climate change, 1995–2004. In: Climatic Change. Vol. 86, No 1-2: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-007-9299-3>

Boykoff, Maxwell T.; Boykoff, Jules M. (2004). Balance as bias: global warming and the US prestige press. In: Global Environmental Change. 14 (125-136): <http://www.eci.ox.ac.uk/publications/downloads/boykoff04-gec.pdf>

Brasseur, Jacob; Schuck-Zöller (Hrsg.) (2017). Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Hamburg.

Brennan, Pat; National Aeronautics and Space Administration (NASA) (2016). Big coastal cities sink faster than seas rise. 30. August 2016: <https://sealevel.nasa.gov/news/58/big-coastal-cities-sink-faster-than-seas-rise>

Brüggemann, Michael; Engesser, Sven (2017). Beyond false balance: How interpretive journalism shapes media coverage of climate change. In: Global Environmental Change. Vol. 42, January 2017 (58-67): <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378016305209>

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (2015). In vierzig Jahren könnte die Arktis eisfrei sein: <https://www.bmbf.de/de/in-vierzig-jahren-koennte-die-arktis-eisfrei-sein-1144.html>

Bundesministerium für Umwelt (2012). Kernaussagen des IPCC Sonderberichtes zu Management des Risikos von Extremereignissen und Katastrophen zur Förderung der Anpassung an den Klimawandel: Übersetzung des Bundesministeriums für Umwelt, des Bundesministeriums für Bildung und Forschung und der deutschen IPCC-Koordinierungsstelle. Berlin.

<http://www.bmub.bund.de/themen/klima-energie/klimaschutz/internationale-klimapolitik/ipcc/kernaussagen-des-ipcc-sonderberichtes/>

Bundesregierung (2016). Entwurf eines Gesetzes zu dem Übereinkommen von Paris vom 12. Dezember 2015. BT-Drs. 18/9520 vom 5.9.2016: <http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/18/095/1809520.pdf>

Bundeszentrale für politische Bildung (BpB) (2014). Vom Menschen gemacht. Der anthropogene Treibhauseffekt: <https://www.bpb.de/gesellschaft/umwelt/klimawandel/38441/anthropogener-treibhauseffekt>

Cardiff University (Hrsg.) (2017). European Perceptions of Climate Change (EPCC). Topline findings of a survey conducted in four European countries in 2016. March 2017: <https://orca.cf.ac.uk/98660/7/EPCC.pdf>

Cazenave, A.; Remy F. (2011). Sea level and climate: measurements and causes of changes. In: WIREs Climate Change 2 (647-662): <http://wires.wiley.com/WileyCDA/WiresArticle/wisId-WCC139.html>

Cook, John (2015). Der Einfluss von Städten auf Temperaturdaten wird oft überschätzt, der Erwärmungstrend unterscheidet sich in urbanen und ländlichen Gebieten kaum. Übersetzt auf: Klimafakten.de (wissenschaftlicher Beirat aus 20 renommierten und bekannten deutschen Klimawissenschaftlern): <https://www.klimafakten.de/behauptungen/behauptung-waermeinseln-staedten-verfaelschen-klimatrends>

Cook, John u.a. (2013). Quantifying the consensus on anthropogenic global warming in the scientific literature. In: Environmental Research Letters. No 8: Abstract: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/8/2/024024/pdf>

Cook, Orekes; Andregg, William u.a. (2016). Consensus on consensus: a synthesis of consensus estimates on human-caused global warming. In: Environmental Research Letters, Vol. 11, No 4: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/11/4/048002>

DeConto, Rob; Pollard, David (2016). Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise. In: Nature 531 (591-597): <https://www.nature.com/nature/journal/v531/n7596/full/nature17145.html>

Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) (2013 aktual.). Empfehlungen zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis. Safeguarding Good Scientific Practice. Memorandum. Bonn: http://www.dfg.de/download/pdf/dfg_im_profil/reden_stellungnahmen/download/empfehlung_wiss_praxis_1310.pdf

Deutscher Wetterdienst (DWD) (2017). Klima-Pressekonferenz des Deutschen Wetterdienstes vom 14.3.2017: http://www.dwd.de/DE/presse/pressekonferenzen/DE/2017/PK_14_03_2017/pressekonferenz.html

-
- Deutscher Wetterdienst (DWD) (2017). Lexikon. Stichwort „Globale Durchschnittstemperatur“: <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=100932&lv3=101038>
- Deutscher Wetterdienst (DWD) (o. J.). Klimagase (CO₂, CH₄, N₂O): http://www.dwd.de/DE/forschung/atmosphaerenbeob/zusammensetzung_atmosphaere/spurengase/inh_nav/klimagase_node.html
- Deutsches Klimakonsortium (DKK) (2015). Hintergrundinformationen des Deutschen Klima-Konsortiums. Wolkenforschung. Artikel vom 11.2.2015: <http://www.deutsches-klima-konsortium.de/de/veranstaltungen/dkk-veranstaltungen/dkk-klima-fruehstueck.html?expand=2303&cHash=94357827087f79c1990aa87ef5250da5>
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) (2013). Am Puls des Klimawandels. Mitteilung vom 5.9.2013: http://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10080/150_read-8055/year-2013/150_page-4/#/gallery/12184
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) (2017). GRACE - Gravity Recovery and Climate Experiment. Fliegende Mission: http://www.dlr.de/rb/desktopdefault.aspx/tabid-6813/11188_read-6309/
- Doran, Peter; Zimmerman, Marie Kendall (2009) Examining the scientific consensus on climate change. In: Eos. Vol. 90, Issue 3 (22-23): <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2009EO030002/abstract>
- Dunlap, Riley E.; Jacques, Peter (2013). Climate Change Denial Books and Conservative Think Tanks. Exploring the Connection. In: American Behavioral Scientist. 57 (6) (699-731): <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3787818/>
- Edenhofer, Ottmar; Kader, Susanne; Minx, Jan (2015). Ist das Zwei-Grad-Ziel wünschenswert und ist es noch erreichbar? Der Beitrag der Wissenschaft zu einer politischen Debatte. In: Max-Planck-Gesellschaft (Hrsg.). Die Zukunft des Klimas. Neue Erkenntnisse, neue Herausforderungen (69-92).
- Elsasser, Shaun; Dunlap, Riley (2013). Leading Voices in the Denier Choir. Conservative Columnists' Dismissal of Global Warming and Denigration of Climate Science. In: American Behavioral Scientist. Vol. 57, No 6: <http://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/0002764212469800>
- Endlicher, Wilfried; Gerstengarbe, Friedrich-Wilhelm (Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Hrsg.) (2007). Der Klimawandel. Einblicke, Rückblicke, Ausblicke. Potsdam: https://www.pik-potsdam.de/services/infothek/buecher_broschueren/.images/broschuere cms 100.pdf
- European Environment Agency (2016). Global and European sea level: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/sea-level-rise-4/assessment-2>
- G20 Climate (Verbund deutscher KlimawissenschaftlerInnen, maßgeblich des Deutschen Klimakonsortiums, DKK) (2017). Klimafakten als Grundlage für politische Entscheidungen. Presseinfor-

mation zum Stand der Forschung vom 6. Juli 2017: http://www.deutsches-klima-konsortium.de/fileadmin/user_upload/pdfs/Veranstaltungen/Climate20/DE/Climate20_Presseinformation.pdf

Gerlach, Terry (2011). Volcanic Versus Anthropogenic Carbon Dioxide. In: EOS Volume 92. Issue 24: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2011EO240001/abstract;jsessionid=DAD6D1D0042D2D86BD46860AF36DA7AE.f03t03>

Gray, L.J. u.a. (2010). Solar in-fluence on Climate. In: Reviews in Geophysics. 48 RG4001 (1-53): <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2009RG000282/full>

Hanson, Susan (2011). A global ranking of port cities with high exposure to climate extremes. In: Climatic Change. 104 (1) (89-111): http://eprints.lse.ac.uk/39981/1/_lse.ac.uk_storage_LIBRARY_Secondary_libfile_shared_repository_Content_Ranger,%20N_Global%20ranking_Ranger_Global%20ranking_2014.pdf

Hoy, A. (2016). Langzeitliche Klimaänderungen in Frankfurt/Main. Datengrundlage und -qualität. In: Klimastatusbericht 2015. Aktuelle Ergebnisse des Klimamonitorings. Langzeitliche Klimaänderungen in Frankfurt/Main (86-101). Offenbach https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimastatusbericht/publikationen/ksb_2015.pdf?blob=publicationFile&v=2

Integrated Climate Data Center (ICDC) (2017). Gesammelte Ozean-Daten. (Datenzentrum der Universität Hamburg): <https://icdc.cen.uni-hamburg.de/daten/ocean.html#c1723>

InterAcademy Council (IAC) (2010). Review of the IPCC: <http://reviewipcc.interacademycouncil.net/>; <http://reviewipcc.interacademycouncil.net/ReportNewsReleaseGerman.html>; http://www.ipcc.ch/organization/organization_review.shtml

International Energy Agency (IEA) (2017). IEA finds CO2 emissions flat for third straight year even as global economy grew in 2016. News 17.3.2017: <https://www.iea.org/news-room/news/2017/march/iea-finds-co2-emissions-flat-for-third-straight-year-even-as-global-economy-grew.html>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2001). Climate Change 2001. Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Watson, R.T. and the Core Writing Team (eds.)]. Cambridge, New York: <http://www.grida.no/publications/267>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007). Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. Geneva (112 Seiten): http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_full_report.pdf

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007). Klimaänderung 2007. Synthesebericht. Deutsche Übersetzung des Syntheseberichts des Vierten Sachstandsberichts der deutschen IPCC-Koordinierungsstelle, 2008. Bonn (118 Seiten): <https://www.ipcc.ch/pdf/reports-nonUN-translations/deutch/IPCC2007-SYR-german.pdf>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2013). Appendix A to the Principles Governing IPCC Work. Procedures for the preparation, review, acceptance, adoption, approval and publication of IPCC Reports: <http://www.ipcc.ch/pdf/ipcc-principles/ipcc-principles-appendix-a-final.pdf>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2013). Summary for Policymakers. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge, New York (28 Seiten) : http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_SPM_FINAL.pdf

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2013). Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. Klimaänderung 2013: Naturwissenschaftliche Grundlagen. Deutsche Übersetzung der Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger der Arbeitsgruppe I durch die deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, die Akademie der Naturwissenschaften der Schweiz und des Österreichischen Umweltbundesamtes, 2014. Bern, Bonn, Wien (34 Seiten): <https://www.ipcc.ch/pdf/reports-nonUN-translations/dutch/ar5-wg1-spm.pdf>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2013). Technical Summary. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Stocker, Thomas; Dahe, Qin; Plattner, Kasper) (84 Seiten): https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_TS_FINAL.pdf

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2013). Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Working Group I (Technical Support Unit, 2014). Frequently Asked Questions (78 Seiten, sowie weitere Internetseiten FAQ): https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/docs/WG1AR5_FAQbrochure_FINAL.pdf; http://ar5-syr.ipcc.ch/topic_observed_changes.php, http://ar5-syr.ipcc.ch/topic_observedchanges.php#section_1_2

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2013). Kernbotschaften des Teilberichts der Arbeitsgruppe I zum Fünften Sachstandsberichts des IPCC. Klimaänderung 2013: Naturwissenschaftliche Grundlagen. Zusammenstellung durch Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit; Bundesministerium für Bildung und Forschung; Umweltbundesamt und deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, 2016. Berlin (5 Seiten): http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/ipcc_sachstandsbericht_5_teil_1_bf.pdf

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2014). Summary for Policymakers. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge, New York (34 Seiten) : http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/ar5_wgII_spm_en.pdf

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2014). Klimaänderung 2014: Synthesebericht. Beitrag der Arbeitsgruppen I, II und III zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC). Deutsche Übersetzung des Syntheseberichts

des Fünften Sachstandsberichts durch die deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, 2016. Bonn (164 Seiten): http://www.de-ipcc.de/media/content/IPCC-AR5_SYR_barrierefrei.pdf

Intergovernmental Panel on Climate Change-Koordinierungsstelle (o.J.). Der Weltklimarat IPCC. KompaktInfo: http://de-ipcc.de/media/de-ipcc-kompaktinfo_IPCC_web.pdf

Intergovernmental Panel on Climate Change-Factsheets sowie Internetseiten zu weiteren Einzelthemen (o.J.):

- zum IPCC: http://www.ipcc.ch/news_and_events/docs/factsheets/FS_what_ipcc.pdf;
- zur Auswahl der Autoren: http://www.ipcc.ch/news_and_events/docs/factsheets/FS_select_authors.pdf ;
- zur Literaturlauswahl: http://www.ipcc.ch/news_and_events/docs/factsheets/FS_ipcc_assess.pdf ;
- zum `Review`-Prozess: http://www.ipcc.ch/news_and_events/docs/factsheets/FS_review_process.pdf ;
- zur Verabschiedung der Berichte: http://www.ipcc.ch/news_and_events/docs/factsheets/FS_ipcc_approve.pdf ;
- zu Prinzipien und Prozedere:
• http://www.ipcc.ch/organization/organization_procedures.shtml ;
- zu Fragen zur Entwicklung der Berichte: http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/docs/WG1AR5_Questions.pdf
- zur IPCC-Struktur: http://www.ipcc.ch/organization/organization_structure.shtml
- zur Liste der Beobachter-Organisationen: <http://www.ipcc.ch/apps/contact/interface/organizationall.php>
- zur Liste der Leitautoren und Review Editors für alle Kapitel des Fünften Sachstandsberichts: http://www.ipcc.ch/pdf/ar5/ar5_authors_review_editors_updated.pdf
- zur kontinuierlichen Mitteilung von Anmerkungen und Fehlern: ipccerrorprotocol@wmo.int; http://www.ipcc.ch/organization/organization_procedures.shtml#tabs-1
- alle Kommentierungen der Gutachter und Entgegnungen des Autorenteam: <http://www.climatechange2013.org/report/drafts-and-review-materials/>
- zu den Rechten der Beobachterorganisationen; http://www.ipcc.ch/organization/organization_procedures.shtml
- zur Registrierung für den "The Expert Review of the First Order Draft of the IPCC Special Report Global Warming of 1.5 °C": <https://www.ipcc.ch/apps/comments/sr15/fod/registry.php>
- zu Prinzipien und Prozessen der Begutachtung: http://www.ipcc.ch/organization/organization_procedures.shtml
- zu Voraussetzungen für eine Akkreditierung: <http://www.ipcc.ch/pdf/ipcc-principles/ipcc-principles-observer-org.pdf>
- zu Vorgaben des IPCC zur Vermeidung von Interessenkonflikten: <http://www.ipcc.ch/pdf/ipcc-principles/ipcc-conflict-of-interest-2016.pdf>
- zu Zeitplänen für die Sonderberichte: <http://www.de-ipcc.de/de/254.php>

Institut für Umweltphysik der Universität Bremen (IUP) "CarbonGroup" (o.J.). CO₂, CH₄ und CO observations: http://www.iup.uni-bremen.de/sciamachy/NIR_NADIR_WFM_DOAS/

Institut für Umweltphysik der Universität Bremen (IUP) (2013). Image gallery: SCIAMACHY Data of Carbon Dioxide: http://www.iup.uni-bremen.de/sciamachy/NIR_NA-DIR_WFM_DOAS/wfmd_image_gallery_co2.html

Jacques, Peter J. u.a. (2008). The organisation of denial. Conservative think tanks and environmental scepticism". In: Environmental Politics. 17 (3) (349-385): <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09644010802055576>

Joughin Ian u.a. (2014). Marine Ice Sheet Collapse Potentially Underway for the Thwaites Glacier Basin, West Antarctica. In: Science 12.5.2015: <http://science.sciencemag.org/content/early/2014/05/12/science.1249055.full>

Klimafakten-Internetportal (2017). U.a. (2011,2016): Zur Behauptung „Der Meeresspiegel steigt gar nicht“: <https://www.klimafakten.de/behauptungen/behauptung-der-meeresspiegel-steigt-gar-nicht>

Kühl, L.; Lefebvre, C.; Becker, A.; Deutscher Wetterdienst (DWD) (2016). Klimastatusbericht 2015. Aktuelle Ergebnisse des Klimamonitorings: http://www.dwd.de/DE/leistungen/klimastatusbericht/publikationen/ksb_2015.pdf?blob=publicationFile&v=2

Lewandowsky, S. u.a. (2013). The pivotal role of perceived scientific consensus in acceptance of science. Nature Climate Change 3 (399-404): <http://www.nature.com/nclimate/journal/v3/n4/abs/nclimate1720.html?foxtrotcallback=true>

Lindsey, Rebecca; Climate Government of the USA (2016). Climate Change: Global Sea Level: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-sea-level>

Lindsey, Rebecca; National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) (2017), Climate Change: Global Sea Level. 11.9.2017: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-sea-level>

Marotzke, Jochen (2014). In: FocusOnline vom 23.9.2014. Ist der Klimawandel menschengemacht?: http://www.focus.de/wissen/klima/tid-8638/diskussion_aid_234320.html

Max-Planck- Institut für Meteorologie (MPI-M) (2002).Wie funktioniert der Treibhauseffekt? <https://www.mpimet.mpg.de/kommunikation/fragen-zu-klima-faq/wie-funktioniert-der-treibhauseffekt/>

Max-Planck-Gesellschaft (MPG) (2005). Forschungsbericht 2005. Neue Wege zum Paläoklima: <https://www.mpg.de/828914/forschungsSchwerpunkt>

Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M) (2017). Neue Studie: Warum die europäischen Winter während der Kleinen Eiszeit so kalt waren. Artikel vom 30.8.2017: https://www.mpimet.mpg.de/kommunikation/aktuelles/single-news/news/neue-studie-warum-die-europaeischen-winter-waehrend-der-kleinen-eiszeit-so-kalt-wa-ren/?tx_news_pi1%5Bcontrol%5D=News&tx_news_pi1%5Baction%5D=detail&cHash=c5ea9279a7c3c65ba42e16db7cd6e8d1

Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung (MPS) (2009). Der Einfluss der Sonne auf das Erdklima. In: Forschungsinfo 2/2009: <https://www.mps.mpg.de/442697/19Der-Einfluss-der-Sonne-auf-das-Erdklima.pdf>

Motta, Rob; White, James; Nerem, Steven (2016). Ten things you should know about sea level rise. Colorado University. Colorado University, NASA. In: Washington Post 20.5.2016: https://www.washingtonpost.com/news/capital-weather-gang/wp/2016/05/20/10-things-you-should-know-about-sea-level-rise-and-how-bad-it-could-be/?utm_term=.6178aa62fd9e

National Aeronautics and Space Administration (NASA) (2017). Greenland ice loss 2002-2016. August 2016: <https://sealevel.nasa.gov/resources/89/greenland-ice-loss-2002-2016>

National Aeronautics and Space Administration (NASA) (2017). 25-years of-global sea level data and counting 22. August 2017: <https://sealevel.nasa.gov/news/90/25-years-of-global-sea-level-data-and-counting>

National Aeronautics and Space Administration (NASA) 2017). Global Mean Sea Level. SATELLITE DATA: 1993 – PRESENT: <https://sealevel.nasa.gov/>

National Aeronautics and Space Administration (NASA); NASA's Goddard Institute for Space Studies (GISS). (2017). Data since 1880, base period 1951-1980: <https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/>

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) (2015). Global Mean Sea Level – Graph: <https://www.climate.gov/maps-data/dataset/global-mean-sea-level-graph>

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) (2017). Climate at a Glance: Global Time Series, published July 2017, retrieved on August 17, 2017: <http://www.ncdc.noaa.gov/cag/>

National Oceanic and Atmospheric Administration Earth System Research Laboratory (NOAA ESRL) (2016). How we measure background CO2 levels on Mauna Loa. Colorado: https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/about/co2_measurements.html

Nicholls, R.J.; Cazenave A. (2010). Sea-Level Rise and Its Impact on Coastal Zones. In: Science 328 (1517-1520): <http://science.sciencemag.org/content/328/5985/1517.long>

Nisbet, Matthew; Myers, Teresa (2007). The Polls—Trends. Twenty Years of Public Opinion about Global Warming. In: Public Opinion Quarterly. Vol. 71, Issue 3 (444–470): <https://academic.oup.com/poq/article/71/3/444/1858123/The-Polls-TrendsTwenty-Years-of-Public-Opinion>

Notz, Dirk, Max-Planck Institut für Meteorologie (MPI-M) (2015). Das Meereis in der Antarktis. In: Lozán, J. L. u.a. (Hrsg.). Warnsignal Klima: Das Eis der Erde (204-209): <http://www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de/eis-der-erde/eis-der-erde-buch-kap-5-4/>

O'Neil, Brian C. u.a. (2017). IPCC reasons for concern regarding climate change risks. In: Nature Climate Change. Review article. 4.1.2017. Vol. 7. (28-37): http://www.nature.com/nclimate/journal/v7/n1/fig_tab/nclimate3179_F1.html

Oreskes, Naomi (2004). The Scientific Consensus on Climate Change. In: Science. Vol. 306, Issue 5702 (1686): <http://science.sciencemag.org/content/306/5702/1686.full>

Painter, James (Reuters Institute for the Study of Journalism, University of Oxford) (2011). Poles Apart: The international reporting of climate scepticism. Oxford: <http://reutersinstitute.politics.ox.ac.uk/sites/default/files/research/files/Poles%20Apart%20the%20international%20reporting%20of%20climate%20scepticism.pdf>

Petit, J.R. u.a. (1999). Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. In: Nature 399 (429-436).

Pew Research Center (Pew) (2012). More Say There is Solid Evidence of Global Warming. Washington D.C.: <http://www.people-press.org/files/legacy-pdf/10-15-12%20Global%20Warming%20Release.pdf>

Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos; World Radiation Center (PMOD/WRC) (2017). Annual Report 2016. Davos: https://www.pmodwrc.ch/annual_report/2016_PMODWRC_Annual_Report.pdf

Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos; World Radiation Center (PMOD/WRC) (2014, 2017). Solar Constant. Construction of a Composite Total Solar Irradiance (TSI) Time Series from 1978 to present: <https://www.pmodwrc.ch/pmod.php?topic=tsi/composite/Solar-Constant>

PollingReport (2017, hier 2016). Zusammenstellung aller landesweiten US-Umfragen: <http://www.pollingreport.com/enviro.htm>

Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) (2009). Risiken der globalen Erwärmung müssen höher eingeschätzt werden: <https://www.pik-potsdam.de/aktuelles/pressemitteilungen/archiv/2009/sperrfrist-montag-23-uhr-risiken-der-globalen-erwaermung-muessen-hoehereingeschaetzt-werden>

Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) (2017). Kippelemente – Achillesfersen im Erdsystem: <https://www.pik-potsdam.de/services/infothek/kippelemente>

Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) (2017). Kippelemente – Achillesfersen im Erdsystem: <https://www.pik-potsdam.de/services/infothek/kippelemente>

Rahmstorf, Stefan (2004). The climate sceptics. In: Weather catastrophes and climate change (78-83): http://www.pik-potsdam.de/~stefan/Publications/Other/rahmstorf_climate_sceptics_2004.pdf

Rahmstorf, Stefan (2016). Global temperature goes from heat record to heat record, yet the sun is at its dimmest for half a century. Artikel vom 14.11.2016: <http://www.realclimate.org/index.php/archives/2016/11/record-heat-despite-a-cold-sun/#more-19702>

Rahmstorf, Stefan (2017). April 2017 was second-warmest April on record, beaten only by last year: <https://twitter.com/rahmstorf/status/864183821046091776>

Rahmstorf, Stefan (2017). Nah dran am Wandel. In: KlimaLounge von Stefan Rahmstorf. (U.a Beitrag vom 1. Juli 2017: Das Klima hat sich schon immer geändert. Was folgern Sie?): <https://scilogs.spektrum.de/klimalounge>; <https://scilogs.spektrum.de/klimalounge/das-klima-hat-sich-schon-immer-geaendert-folgern-sie/>

RealClimate-(u.a. Climate System Research Centers der University of Massachusetts) (2017). Index: <http://www.realclimate.org/index.php/archives/2004/12/index/#Responses>

ScepticalScience (2015). Is Antarctica gaining or losing ice? What the science says: <https://skepticalscience.com/antarctica-gaining-ice-intermediate.htm>

Schönwiese, Christian (2013). Klimatologie. 4. Auflage. Stuttgart.

Scripps Institution of Oceanography (Scripps) (2017). CO2-Program. Thousands of Years ago: https://scripps.ucsd.edu/programs/keelingcurve/wp-content/plugins/sio-blumoon/graphs/co2_800k.png

Scripps Institution of Oceanography (Scripps) (2017). SCRIPPS CO2-Program. Lessons for long-term earth observations: http://scrippSCO2.ucsd.edu/history_legacy/keeling_curve_lessons

Scripps Institution of Oceanography (Scripps) (2017). The Keeling Curve. Carbon dioxide concentration at Mauna Loa Observatory. Latest Reading August 6, 2017: <https://scripps.ucsd.edu/programs/keelingcurve/>; https://scripps.ucsd.edu/programs/keelingcurve/wp-content/plugins/sio-blumoon/graphs/mlo_full_record.png

Staud, Toralf (2012). Forscher fühlen sich von Klimaskeptiker Vahrenholt instrumentalisiert. In: Die Zeit vom 10.8.2012: <http://www.zeit.de/wissen/umwelt/2012-08/klimaforscher-vahrenholt-kritik>

Trenberth, Kevin E. u.a. (2009). Earths´ global energy budget. American Meteorological society. March: <http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/2008BAMS2634.1>

Umweltbundesamt (UBA) (2012). Sonne, Treibhausgase, Aerosole, Vulkanausbrüche - gibt es einen Favoriten bei Klimaänderungen? Dessau-Roßlau: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/sonne-treibhausgase-aerosole-vulkanausbrueche>

Umweltbundesamt (UBA) (2013). Und sie erwärmt sich doch – Was steckt hinter der Debatte um den Klimawandel?: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/sie-erwaermt-sich-doch-was-steckt-hinter-debatte-um>

Umweltbundesamt (UBA) (2015). Häufige Fragen zum Klimawandel. Internetseite: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimawandel/haeufige-fragen-klimawandel#textpart-1>

Umweltbundesamt (UBA) (2017). Treibhausgas-Emissionen in Deutschland. Artikel vom 20.3.2017: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klimawandel/treibhausgas-emissionen-in-deutschland#textpart-1>

United Nations (UN) (2014). Human cause of global warming is near certainty, UN reports. News 14.1.2014. New York: <http://www.un.org/apps/news/printnewsAr.asp?nid=47047>

van der Linden, Sander u.a. (2015). The Scientific Consensus on Climate Change as a Gateway Belief: Experimental Evidence. In: PLoS One. 2015, 10 (2): <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4340922/>

Warnsignal Klima (2015). (Universität Hamburg, Max-Planck-Institut für Meteorologie, BMUB, Beatrix-Nolte-Stiftung für Natur- und Umweltschutz).

- Der erhöhte Treibhauseffekt der Atmosphäre: <http://www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de/treibhauseffekt/>
- Was ist der Treibhauseffekt?: <http://www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de/treibhauseffekt/>

Wickham, C. u.a. (2013). Influence of Urban Heating on the Global Temperature Land Average using Rural Sites Identified from MODIS Classifications. In: Geoinformatics and Geostatistics: An Overview. Vol: 1: https://www.scitechnol.com/influence-urban-heating-global-temperature-land-average-using-rural-sites-identified-from-modis-classifications-vwBQ.php?article_id=588

Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages (2017). Ozeanversauerung. Aktueller Begriff vom 26. Mai 2017: <https://www.bundestag.de/blob/508708/fb155bd90800d38d00eaae5663a04aec/ozeanversauerung-data.pdf>

World Meteorological Organization (WMO) (2016). COP22 advances global action on climate change. Meteoworld December 2016: <https://public.wmo.int/en/media/news/cop-22-advances-global-action-climate-change>

World Meteorological Organization (WMO) (2017). Climate breaks multiple records in 2016, with global impacts. Press Release No 4. 21.3.2017: <https://public.wmo.int/en/media/press-release/climate-breaks-multiple-records-2016-global-impacts>

World Ocean Review (WOR) (2010, 2015). (Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Exzellenzcluster „Ozean der Zukunft“, Leitung Prof. Martin Visbeck). Klimasystem der Erde. Die schleichende Katastrophe: <http://worldoceanreview.com/wor-1/klimasystem/klimasystem-der-erde/2/>

World Ocean Review (WOR) (2010, 2015). (Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Exzellenzcluster „Ozean der Zukunft“, Leitung Prof. Martin Visbeck). Kapitel Lebensraum Küste:

- Lebensraum Küste: <http://worldoceanreview.com/wor-1/kuesten/lebensraum-kueste/2/>
- Die bange Frage, wie schlimm es wird: <http://worldoceanreview.com/wor-1/kuesten/lebensraum-kueste/>
- Die alte Losung gilt auch morgen. Wer nicht deichen will, muss weichen: <http://worldoceanreview.com/wor-1/kuesten/lebensraum-kueste/2/>
- Die Zukunft der Küste – Verteidigung oder geordneter Rückzug?: <http://worldoceanreview.com/wor-1/kuesten/>
- Die Gefahr durch Meeresspiegelanstieg: <http://worldoceanreview.com/wor-1/kuesten/gefahr-durch-meeresspiegelanstieg/>

Xifra, Jordi (2015). Climate Change Deniers and Advocacy. In: American Behavioral Scientist. Vol. 60, No 3 (276-287): <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0002764215613403>

Yang, Jun u.a. (2012). The role of satellite remote sensing in climate change studies. Nature Climate Change 3 (875–883): <http://www.nature.com/nclimate/journal/v3/n10/full/nclimate1908.html>

Yi, S.; Sun, W; Heki, K.; Qian A. (2015). An increase in the rate of global mean sea level rise since 2010. In: Geophysical Research Letters. 10.1002/2015GL063902: http://www.ep.sci.hokudai.ac.jp/~heki/pdf/Yi_etal_GRL2015.pdf