Basiswissen zur Nachhaltigkeit, Band 1

Klimawandel
Ursachen, Folgen und Lösungsansätze

von

Prof. Dr. Manfred Kiy

(April 2023)

Inhaltsverzeichnis

1 Klima, Klimawandel und Klimadaten ……..……..…… 3

2 Ursachen des Klimawandels ……..…… 10

2.1 Natürliche Ursachen des Klimawandels ……..……..…… 10

2.2 Menschengemachte Ursachen des Klimawandels ..……13

2.3 Das Klimasystem ……..……..…….17

2.4 Mögliche Folgen des Klimawandels ……..…… 18

3 Weltweiter Ausstoß von Treibhausgasen ……..…..……23

4 Deutscher Beitrag zur Lösung des Klimaproblems ……..……. 38

5 Strategien und Instrumente zur Lösung der Klimaproblematik ..……..… 49

5.1 Effizienz-, Konsistenz- und Suffizienz-Strategien ……..……..… 49

5.2 Instrumente zur Bekämpfung des Klimawandels ……..…… 50

Alphabetisches Quellenverzeichnis ……..……..… 60

Kommentiertes Quellenverzeichnis nach Themen ……..…….. 63

Verzeichnis der Abbildungen

1 Temperaturveränderungen in Deutschland 1881-2022 ……..……..… 4

2 Weltweite Temperaturveränderungen 1850-2022……..…….…..6

3 Weltweite Temperaturveränderungen 0-2000……..……..…… 7

4 Erdbahnparameter ……...……..…… 11

5 Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre 1957-2021 ……..……..… 14

Verzeichnis der Tabellen

1 Messstationen des Global Atmosphere Watch - Programmes ……..…….. 15

2 Restbudgets zur Erreichung der Klimaziele ……..……..……. 25

3 Länder mit den höchsten energiebedingten Kohlendioxid-Emissionen …..…….. 28

4 Historische und prognostizierte Entwicklung der Weltbevölkerung …….……29

5 Indikatoren für Länder mit den höchsten CO_2-Emissionen ……..… 30

6 Restbudgets in Abhängigkeit von Temperaturzielen und Verteilungskriterien 33

7 Geplante deutsche Treibhausgas-Emissionen im Zeitraum 2020-2030 …… 38

8 CO_2-Emissionen in Deutschland nach Quellkategorien …….. 43

1 Klima, Klimawandel und Klimadaten

„*Das Klima ist definiert als die Zusammenfassung der Wettererscheinungen, die den mittleren Zustand der Atmosphäre an einem bestimmten Ort oder in einem mehr oder weniger großen Gebiet charakterisieren.*“ (Deutscher Wetterdienst 2021). Für Untersuchungen des Klimas werden üblicherweise Zeiträume von 30 Jahren und mehr betrachtet. Gemessen wird das Klima durch Indikatoren wie Lufttemperatur, Niederschlagsmenge, Windstärke, Luftdruck, Sonnenscheindauer u.a., für die in langfristiger Betrachtungsweise meistens Durchschnittswerte herangezogen werden.

Insofern sind einzelne Wetterphänomene, wie beispielsweise Hitzeperioden in zwei aufeinanderfolgenden Jahren oder einzelne Unwetterereignisse, kein Beweis für einen Wandel des Klimas in einer Region. Vielmehr kann erst der langfristige Vergleich von Klimaperioden Grundlage für Schlussfolgerungen in Bezug auf den Klimawandel sein.

Der wichtigste Indikator zur Beurteilung von Klimaveränderungen ist die Temperatur. Erste regelmäßige Temperaturaufzeichnungen in Deutschland gehen zurück bis auf den Beginn des 18. Jahrhunderts, als nach der Gründung der Königlich-Preußischen Meteorologischen Instituts regelmäßige Temperaturmessungen in Berlin vorgenommen wurden. Allerdings waren diese Messungen aus aktueller wissenschaftlicher Sicht aufgrund der Qualität der Messinstrumente und der uneinheitlichen Messmethoden noch unzureichend. Seit dem Jahr 1881 begannen die ersten systematischen Aufzeichnungen von Temperaturen und Wettererscheinungen in ganz Deutschland. Somit existieren für Deutschland heute langjährige Datenreihen, die durchaus Hinweise auf klimatische Veränderungen geben können.

Als Beginn internationaler Klimaaufzeichnungen kann die Gründung der Mannheimer Meteorologischen Gesellschaft (*Societas Meteorologica Palatin*) betrachtet werden. Sie wurde im Jahr 1780 als meteorologische Klasse der kurpfälzischen Akademie der Wissenschaften in Mannheim gegründet und war die erste Institution, die an mehr als 30 Messstationen in europäischen Ländern sowie Grönland und Nordamerika Klimabeobachtungen (Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Wind) in einem einheitlichen Messrahmen (Mannheimer Stunden) organisiert hat. Die Veröffentlichung der Daten erfolgte in einer Fachpublikation mit Namen *Palatina Ephemerides Societatis Meteorologicae Palatinae*.

Die bis zur Mitte des letzten Jahrhunderts (nach heutigen Maßstäben) nicht überall zufriedenstellende Qualität der Klimaaufzeichnungen wird häufig als Gegenargument verwendet, wenn die Temperaturveränderungen seit Beginn der Industrialisierung bezweifelt werden. Allerdings existieren spätestens seit den fünfziger Jahren des letzten Jahrhunderts

erheblich verfeinerte Messmethoden, die zumindest für die vergangenen 70 Jahre Veränderungen der Temperaturen in Deutschland und der meisten Regionen der Welt signifikant feststellen konnten. Beispielsweise werden die Temperaturen in Deutschland seit dem Jahr 1951 an 78 Messstellen des Deutschen Wetterdienstes gemessen, später sogar noch ergänzt durch Messungen privater Wetterbeobachter.

Das Messnetz in Deutschland ist für die Temperatur und die Niederschlagshöhe seit 1881 so dicht, dass sogenannte Rasterfelder für einzelne Monate und daraus abgeleitete Mittelwerte erstellt werden, die in entsprechende Zeitreihendiagramme umgesetzt werden können. Die Rasterfelder haben eine Auflösung von einem Kilometer. Sie liegen auch den Klimakarten für Deutschland zugrunde. Gegenüber Zeitreihen einzelner Stationen sind die Zeitreihen von solchen Gebietsmitteln weitgehend frei von Inhomogenitäten, die durch Stationsverlegungen oder Veränderungen im Umfeld einer Station entstehen. Nach Angaben des Deutschen Wetterdienstes liegt ein vergleichbar dichtes Messnetz für die Sonnenscheindauer erst seit der Mitte des 20. Jahrhunderts vor (siehe dazu u.a. Müller-Westermeier o.J.)

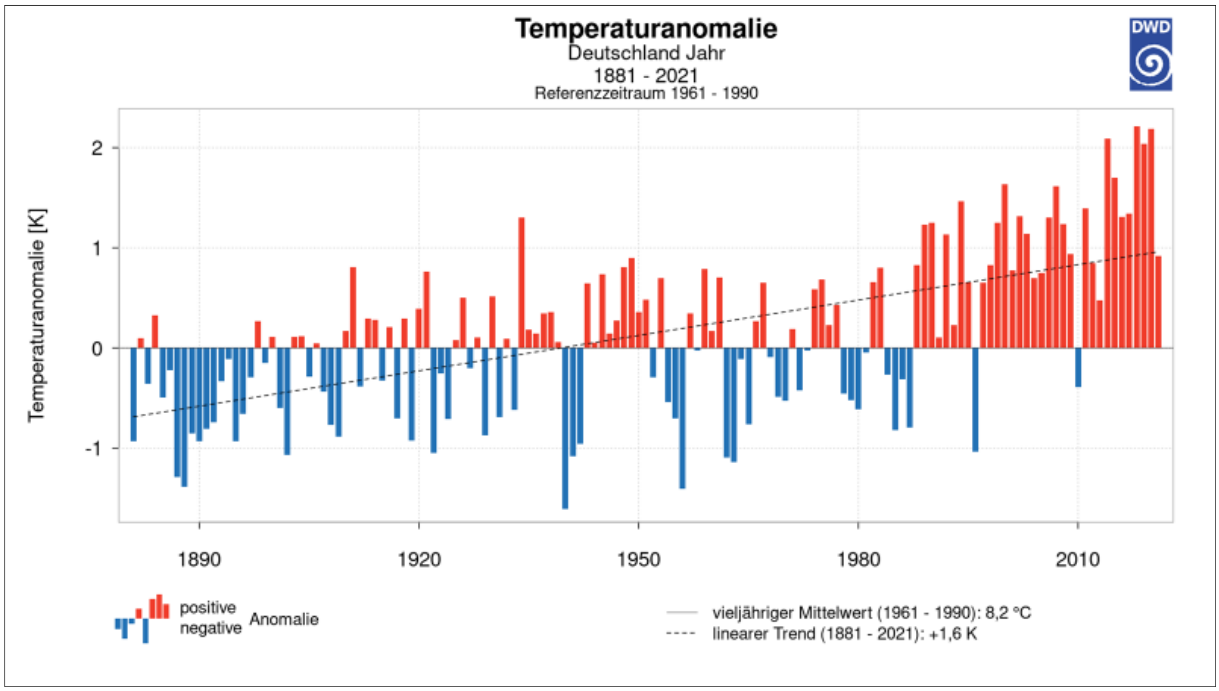

Abb. 1: Temperaturveränderungen in Deutschland 1881-2022
(Abweichungen vom Mittelwert der Jahre 1961 – 1990)
Quelle: DWD 2022

In Abbildung 1 sind die Abweichungen der Lufttemperatur von der sogenannten CLINO-Periode 1961 bis 1990 (Klimanormalperiode[1]) für Deutschland dargestellt. Spätestens seit 1990, also seit mehr als 30 Jahren, sind in Deutschland (bis auf zwei Ausnahmen) in jedem Jahr Temperaturen über dem Durchschnittswert der Klimanormalperiode feststellbar. Im Zeitraum 1950 bis 1990 schwanken die Temperaturdaten unregelmäßig um diesen Mittelwert, eine generelle Tendenz ist noch nicht zu erkennen. Insofern waren in diesem Zeitraum Aussagen über mögliche langfristige Klimatendenzen für Deutschland nicht eindeutig möglich.

Auch weltweite Daten liegen – zumindest für die vergangenen 60 Jahre - in umfassender Form vor. Ein Eindruck davon gibt die Übersicht des Deutschen Wetterdienstes über weltweite Monatstemperaturen für die Klimaperiode 1961 bis 1990. Diesen Analysekarten liegen Monatsmitteltemperaturen von derzeit mehr als 2.800 Wetterstationen weltweit zugrunde. Die Daten stammen vorrangig aus monatlichen Klimameldungen (CLIMAT-Daten), die von den nationalen Wetterdiensten global verbreitet werden. Die einzelnen Punktmessungen werden unter Anwendung des Verfahrens der sogenannten inversen Distanz-Wichtung auf ein 1-Grad-Gitterpunktsnetz interpoliert (DWD 2022). Aus den weltweiten Stationsdaten können unter anderem globale Temperaturentwicklungen zusammengefasst werden. Häufig genutzte Datenreihen zu den weltweiten Temperaturen an der Erdoberfläche stammen vom Goddard-Institut für Weltraumforschung (GISS) der US-Weltraumbehörde NASA, vom Klimadatenzentrum (NCEI) der US-Ozean- und Atmosphärenbehörde (NOAA) und von der Klimaforschungsabteilung (CRU) der University of East Anglia.

Neben diesen direkten Beobachtungsdaten gibt es auch andere Daten, die auf indirektem Wege über Stellvertreterinformationen, sogenannte Klima-Proxies, gewonnen werden. Unter einem Proxy versteht man in der Klimaforschung natürliche Temperatur-Informationsquellen, etwa Baumringe, Tropfsteine, Korallen, Seesedimente oder Eisbohrkerne. Die Daten aus Eisbohrkernen bieten beispielsweise die Möglichkeit, Temperaturen und andere Informationen (z.B. Niederschläge, Zusammensetzung der Atmosphäre) für weit zurückliegende Zeiträume anzugeben. So reichen die Daten des rund 3700 Meter tiefen Wostok-Eisbohrkerns in der Ostantarktis etwa 420.000 Jahre zurück. Für näher gelegene Zeitabschnitte, die eher im letzten Jahrtausend liegen, sind Proxies wie Baumringe hilfreich. Allerdings haben die so ermittelten

[1] Die CLINO-Periode (climate normal) ist ein 30-jähriger Bezugszeitraum, der auf Empfehlung der Weltorganisation für Meteorologie für den Vergleich von Wetterdaten in verschiedenen Ländern herangezogen wird. Seit dem Jahr 2021 ist die Klimanormalperiode 1961-1990 von dem Zeitraum 1991-2020 abgelöst worden.

Temperaturinformationen eine nicht so gute Qualität wie die Daten der Wetterstationen in den vergangenen 60 Jahren.

Ein weitere Datenquelle beruht auf sogenannten Re-Analysen. Dabei werden historische Messdaten nicht nur für Temperaturen, sondern auch für andere Parameter wie Luftdruck und Ozeantemperaturen gesammelt und in computerbasierte Klima- oder Wettermodelle eingegeben. Diese füllen dann zeitliche oder räumliche Lücken in anderen Messreihen, indem sie die Beobachtungen als Anfangszustand nutzen und einen konsistenten Satz an Vorhersagedaten produzieren. Re-Analysen sind somit jeweils abhängig von den verwendeten Beobachtungen und Modellsystemen. Sie stellen eine Näherung an den wirklichen Klima- und Wetterverlauf dar.

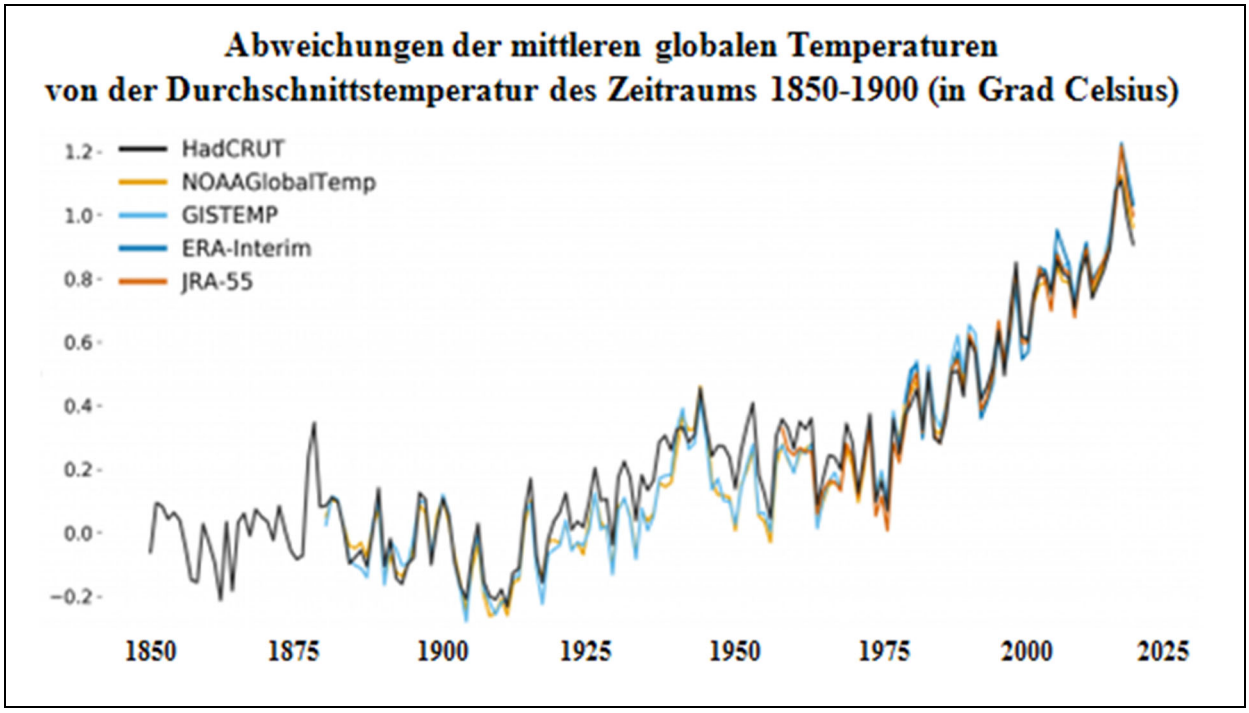

Abb. 2: Weltweite Temperaturveränderungen 1850-2022
Quelle: Met Office 2022

In Abbildung 2 sind die Datenrekonstruktionen verschiedener bekannter Klimaforschungs-Institutionen zusammengestellt:

- HadCRUT (Hadley Centre des Met Office (Vereinigtes Königreich) u.a.)
- NOAAGlobalTemp (National Oceanic and Atmospheric Administration (USA))
- GISTEMP (Goddart Institute for Space Studies (USA)
- ERA-Interim (Europäischen Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage (Europa))
- JRA-55 (The Japan Meteorological Agency (Japan))

Die Zeitreihen zeigen eine große Übereinstimmung für den Zeitraum von 1960 bis 2020 auf, was die zuvor beschriebene Qualität der Messmethoden nach dem 2. Weltkrieg bestätigt. Weiter zurückliegende Temperaturreihen, insbesondere für den Zeitraum vor 1900 weichen stärker voneinander ab. Insofern kann der - in der aktuellen Klimadiskussion verwendete -Vergleich der heutigen Temperaturen zum Durchschnitt der Jahre 1850 bis 1900 manchmal als wenig hilfreich angesehen werden, da dadurch eine Kritik an der Genauigkeit der Vergleiche entsteht. Die gemessenen Temperaturanstiege seit 1960 (also dem Beginn der ersten Klimanormalperiode) sind demgegenüber qualitativ sauber ermittelt, transparent nachvollziehbar und so deutlich, dass sie als Hinweis auf einen entstehenden oder bereits existierenden Klimawandel ausreichen.

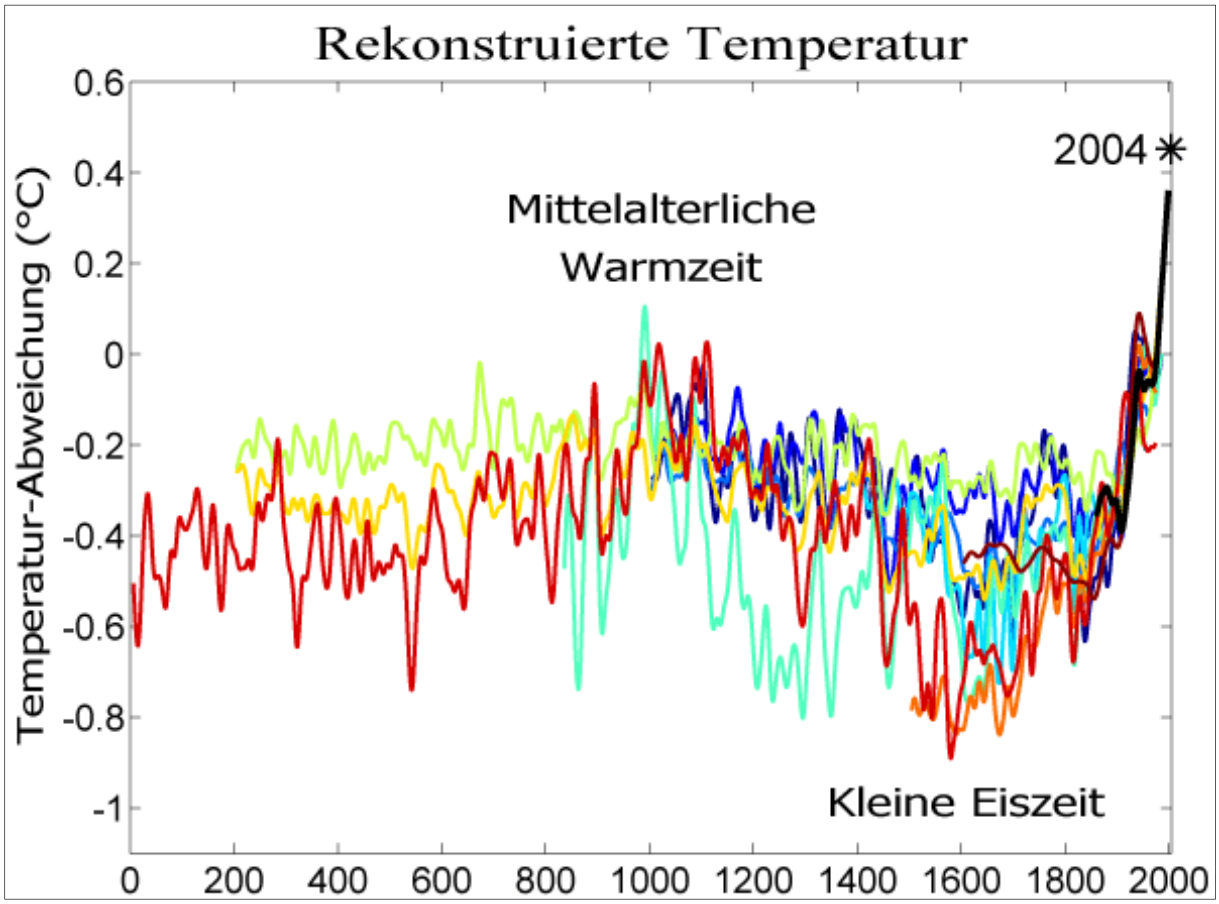

Abb. 3: Weltweite Temperaturveränderungen 0-2000
(Abweichungen vom Mittelwert der Jahre 1850 – 1900)
Quelle: Wikimedia Commons
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:2000_Jahre_Temperaturen-Vergleich.png

Betrachtet man die Temperaturdaten-Rekonstruktionen für längere zurückliegende Zeiträume, wird der oben beschriebene Eindruck bestätigt. Die Zusammenstellung der Temperatur-

Zeitreihen in Abbildung 3 zeigt einerseits eine gute Übereinstimmung der verschiedenen Methoden ab 1900. Für den Zeitraum vor 1800 weichen die einzelnen Datenreihen aber merklich voneinander ab.

Ob die aktuellen Temperaturerhöhungen in der Entwicklung der Erde der letzten 2000 Jahre einzigartig sind oder auch in früheren Jahrhunderten auftraten, wird immer noch kontrovers diskutiert. In diesem Zusammenhang werden insbesondere die sogenannte „mittelalterliche Warmzeit“ (900 bis 1250) und die nachfolgende „kleine Eiszeit“ (1300 bis 1850) genannt.

Mittlerweile kommt die überwiegende Anzahl der Studien aber zu dem Schluss, dass beide Klimaperioden auf der Nordhalbkugel der Erde zwar existierten, dafür aber auf anderen Teilen der Erde entgegengesetzte Entwicklungen existierten, so dass die seit 30 Jahren feststellbare weltweite Temperaturerhöhung ein zeitgeschichtlich einzigartiges Phänomen ist: *"Die Rekonstruktionen der Oberflächentemperatur im kontinentalen Maßstab zeigen, mit hoher Sicherheit, dass während der Mittelalterlichen Warmzeit in einigen Regionen Temperaturen herrschten wie zur Mitte des 20. Jahrhunderts und in anderen sogar wie zum Ende des 20. Jahrhunderts. Mit großer Sicherheit waren diese regionalen Wärmeperioden aber nicht so synchron wie die Erwärmung seit Mitte des 20. Jahrhunderts."* (IPCC 2019, Kapitel 5). Allerdings sind die zugrundeliegenden Analysen, die mit Hilfe von Proxy-Größen durchgeführt worden, noch nicht abgeschlossen. Abschließende Erklärungen der Ursachen der „Mittelalterlichen Warmzeit“ und der „Kleinen Eiszeit“ existieren noch nicht.

Zwischenfazit:

- Für den Zeitraum seit 1990 bis heute sind für Deutschland und andere Regionen der Welt nachweislich erhöhte Temperaturen gegenüber der Normalperiode 1961-1990 beobachtbar.
- Der Temperaturanstieg im Vergleich zum Zeitraum 1850 bis 1900 ist nach derzeitigem wissenschaftlichem Stand sehr wahrscheinlich. Die Fehlermarge dieser Beobachtungen bzw. Analysen wird vom überwiegenden Teil der Wissenschaft als so gering angesehen, dass dadurch der festgestellte Klimawandel nicht zu bezweifeln ist.
- Allerdings ist zu hinterfragen, ob der Vergleich zu einer Durchschnittstemperatur des Zeitraums 1850 bis 1900 sinnvoll ist. Das bekannte 1,5°-Ziel der Temperaturdeckelung geht von dieser Durchschnittstemperatur aus. Es wäre vielleicht sinnvoller, die Durchschnittstemperatur der Klimaperiode 1961 bis 1990 als Ausganspunkt zugrunde zu legen und darauf Temperaturziele zu formulieren. Die angestrebten Ziele würden nur zahlenmäßig nach unten verschoben, inhaltlich würde sich nichts verändern. Es ist unbestritten, dass in der Klimaperiode 1991 bis 2020 die Temperaturen signifikant angestiegen sind; zudem sind die Ausgangsdaten für den Zeitraum 1961 bis 1990 als sehr zuverlässig zu bezeichnen. Der Verzicht auf die Durchschnittstemperatur eines Zeitraumes mit eindeutig schlechterer Datenqualität (insbesondere weltweit) würde einen Kritikpunkt derjenigen, die den Klimawandel bezweifeln, entschärfen.
- Bis zum Ende der ersten Klimanormalperiode waren die Temperaturdaten nicht so eindeutig, dass eine breite Öffentlichkeit von einer Tendenz zu einer globalen Erwärmung überzeugt war (bzw. hätte sein müssen). Nicht verwunderlich sind deshalb Zeitungsartikel wie: „*Scientists Ask Why World Climate Is Changing*“ aus der New York Times vom 21. Mai 1975, in der auch die Möglichkeit einer neuen Eiszeit in Betracht gezogen wird (Sullivan, W.; 21. Mai 1975). Allerdings sollte nicht unerwähnt bleiben, dass bereits damals ein überwiegender Teil der Wissenschaft eher von einer globalen Erwärmung ausging (siehe dazu: Peterson, T.; 2008: The Myth of the 1970s global cooling Scientific consensus).

2 Ursachen des Klimawandels

Die Veränderung des weltweiten Klimas kann auf zwei Kategorien von Ursachen beruhen:

a) Natürliche Ursachen, die vom Menschen nicht beeinflusst werden können. Dazu gehören sogenannte geoastrophysikalische Veränderungen (z.B. die Solarkonstante oder Erdbahnparameter), natürliche Veränderungen der Erdoberfläche oder Vulkanismus, der zu Veränderungen des Stoffhaushaltes der Atmosphäre führen kann.
b) Menschengemachte (anthropogene) Veränderungen, z.B. Änderungen des Stoffhaushaltes der Atmosphäre durch den Ausstoß von Treibhausgasen.

2.1 Natürliche Ursachen des Klimawandels

Solarkonstante und Erdbahnparameter

Die Grundlage des Lebens auf der Erde ist die Sonnenstrahlung. Alle auf der Erde existierende Energie ist letztlich auf die Aktivitäten der Sonne zurückzuführen. Insofern hat eine Veränderung der Strahlungsintensität der Sonne einen direkten Einfluss auf das weltweite Klima. Die mittlere Strahlungsleistung der Sonne wird als **Solarkonstante** (Total Solar Irradiance) bezeichnet[2]. Sie ist die Strahlungsleistung, die oberhalb des Atmosphäreneinflusses bei mittlerem Sonnenabstand und senkrechtem Strahleneinfall durch eine bestimmte Flächeneinheit fließt. Wenn es keine Atmosphäre gäbe, würde diese Energie vollständig auf der Erde ankommen. Der Mittelwert für die Solarkonstante wurde von der Weltorganisation für Meteorologie auf 1,367 Kilowatt pro Quadratmeter ($kW/m^{2)}$ festgelegt.

Die tatsächliche Strahlungsintensität schwankt um diesen Wert in einem 11-jährigen Zyklus, der bisher dreimal direkt über Satellitensonden gemessen werden konnte[3]; darüber hinaus kann dieser Zyklus mit Hilfe von sogenannten Stellvertreterdaten (Kohlenstoff- und Berylliumisotope; siehe Max-Planck-Institut 2021) über einen erheblich längeren Zeitraum bestätigt werden. Innerhalb eines Zyklus ist eine hohe Zahl von Sonnenflecken mit erhöhter Strahlungsintensität und umgekehrt feststellbar.

Allerdings ist innerhalb eines 11-jährigen Zyklus bisher nur ein Anstieg der Strahlungsintensität um 0,1 Prozent zu beobachten, der nicht ausreicht die Temperaturanstiege der letzten Jahrzehnte zu erklären. Über den 11-jährigen Zyklus hinaus werden weitere langfristige

[2] Der Begriff „Solarkonstante“ geht zurück auf die fälschliche Annahme früherer Forscher, dass die Sonnenstrahlung stets unverändert ist. Mittlerweile ist aber unstrittig, dass es Schwankungen der Strahlungsintensität gibt.
[3] Beobachtungen von Sonnenaktivitäten gibt es zwar seit der Entdeckung des Fernrohrs seit Beginn des 17. Jahrhunderts. Allerdings erfolgen Messungen der Sonnenstrahlung mit Hilfe von Satelliten erst seit 1980.

Veränderungen der Strahlungsintensität vermutet. Bekannt sind derzeit ein 80-jähriger Zyklus sowie weitere Variationen über längere Zeiträume. Ob die Mittelalterliche Warmzeit oder die Kleine Eiszeit in direktem Zusammenhang zu Veränderungen der Strahlungsintensität stehen, ist nach aktuellem Stand noch nicht abschließend geklärt worden.

Erdbahnparameter beschreiben die Veränderung der Erdumlaufbahn und der Rotationsachse der Erde:

a) **Form der Erdumlaufbahn (Exzentrizität)**:
   Die Erde bewegt sich nicht gleichmäßig kreisförmig, sondern elliptisch um die Sonne. Ursache ist die Anziehungskraft durch andere Planeten (insbesondere den Jupiter) und den Mond. Die Veränderung der Exzentrizität vollzieht sich dabei in einem Zeitraum von etwa 100.000 Jahren.

b) **Neigung der Erdachse (Obliquität)**:
   Die Neigung der Erdachse gegenüber der Erdbahnebene schwankt zwischen 22,5 Grad und 24,5 Grad. Die Schwankungen erfolgen in einem Zeitraum von rund 40.000 Jahren.

c) **Pendeln der Ausrichtung der Erdrotationsachse (Präzession)** auf den Polarstern und den Stern Wega. Die Ausrichtung verändert sich in einem Zeitraum von etwa 26. 000 Jahren.

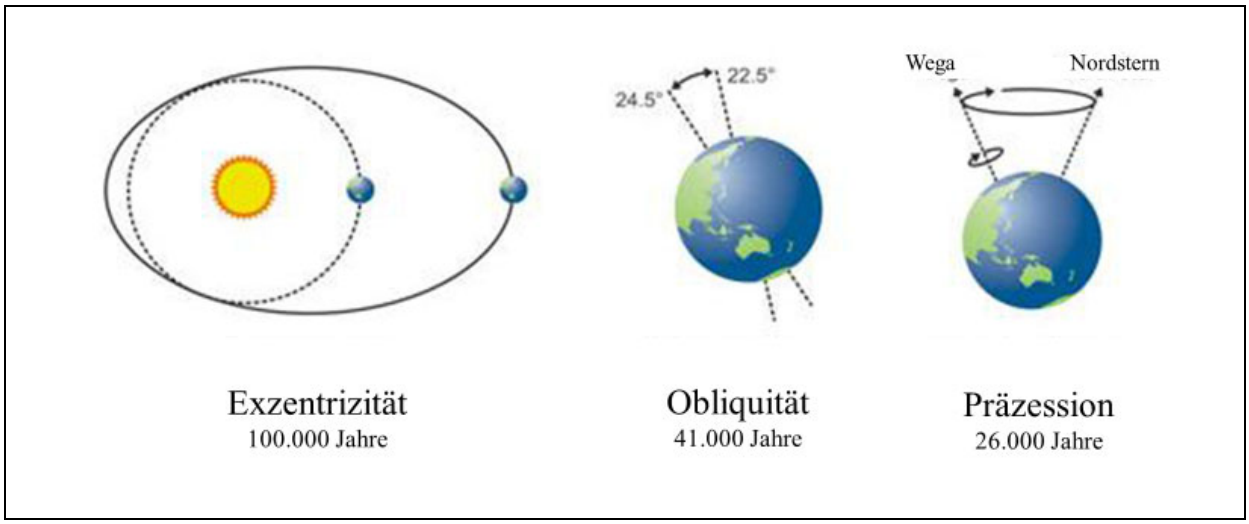

Abb. 4: Erdbahnparameter
Quelle: in Anlehnung an John Cook/klimafakten.de 2010

Nach derzeitigem Wissensstand wird die Ursache für die verhältnismäßig regelmäßigen Schwankungen zwischen Kalt- und Warmzeiten in der jüngsten erdgeschichtlichen Zeit, dem Quartär (seit etwa 2,6 Millionen Jahren), in der Veränderung dieser Erdbahnparameter gesehen. Die drei genannten Effekte überlagern sich und bewirken langfristige Veränderungen

der Strahlungsintensität der Sonne. Diese sogenannten Milanković-Zyklen[4] führen in Abständen von etwa 100.000 Jahren zu natürlichen Erderwärmungen. Der Ablauf dieser Erwärmungen vollzieht sich allerdings über Zeitspannen von Jahrtausenden; er ist somit nicht vergleichbar zu der Erderwärmung, die heute feststellbar ist.

Vulkanausbrüche

Vulkanausbrüche können direkte regionale und - in Extremfällen - globale Klimaauswirkungen haben. Dies gilt insbesondere für sehr große, explosive Vulkanausbrüche. Mit ihren manchmal bis zu 40 Kilometer hohen Eruptionssäulen transportieren sie große Mengen an klimawirksamen Gasen (z.B. Schwefel) und Asche direkt bis in die Stratosphäre (zwischen 12 und 50 km über der Erdoberfläche), wo sie eine Aerosolschicht[5] bilden. Diese Schicht bewirkt, dass die wärmenden Sonnenstrahlen mit geringerer Intensität auf die Erdoberfläche gelangen. Nach derartigen Vulkanausbrüchen sind noch jahrelang deutlich niedrigere Oberflächentemperaturen feststellbar. Beispielsweise betrug die Verringerung der Strahlungsintensität der Sonne ein Jahr nach dem größten Vulkanausbruch des 20. Jahrhunderts (Pinatubo auf den Philippinen im Jahr 1991) 3,2 W/m^2; zwei Jahre danach waren es noch 0,9 W/m^2. Zudem zerstören die vulkanischen Gase die Ozonschicht in der Stratosphäre.

Die vulkanischen CO_2-Emissionen, die einen Anstieg der Temperaturen auf der Erde bewirken könnten, sind nach derzeitigen wissenschaftlichen Erkenntnissen relativ gering. Sie betragen etwa 0,3 bis 0,6 Milliarden Tonnen Kohlenstoffdioxid pro Jahr, das entspricht etwa 1 bis 2 Prozent des derzeitigen menschenverursachten CO_2-Ausstosses (vgl. u.a. Holloway u.a. 2005 und Gerlach 2011). Demgegenüber zeigen Studien (z.B. GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung, Kiel 2017), dass es zwischen den Erdzeitaltern Paläozän und Eozän (vor etwa 56 Mio. Jahren) innerhalb weniger tausend Jahre schnelle Temperaturanstiege von fünf Grad (Celsius) und mehr gegeben hat. Diese sind unter anderem auf sehr starke Vulkanausbrüche im Nordatlantik zurückzuführen. Da die Erwärmung den Übergang zwischen den Erdzeitaltern Paläozän und Eozän markiert, wird sie als Paläozänes/Eozänes-Temperaturmaximum (PETM) bezeichnet. Der Rückgang auf das Niveau vor Beginn des PETM dauerte etwa 150.000 Jahre. Zu den genauen Ursachen des PETMs gibt es in der Forschung allerdings noch keine vollständige Erklärung.

[4] Die Milanković-Zyklen sind nach dem serbischen Mathematiker Milutin Milanković (1879–1958) benannt, der diese Zusammenhänge zu Beginn des 20. Jahrhunderts analysiert hat.

[5] Aerosole sind (meteorologisch gesehen) Bestandteile von Beimengungen der Atmosphäre. Sie beteiligen sich wesentlich am luftchemischen Wirkungskomplex und spielen bei Strahlungsprozessen (Absorption, Streuung, Extinktion) eine wichtige Rolle (DWD 2022).

2.2 Menschengemachte Ursachen des Klimawandels

Treibhauseffekt

Die Temperaturen auf der Erde hängen nicht nur davon ab, wieviel Sonnenstrahlung auf der Erde ankommt. Es ist darüber hinaus wichtig, wieviel dieser Energie wieder in den Weltraum abgegeben wird. Die langwellige Wärmestrahlung der Erdoberfläche verlässt die Atmosphäre nicht direkt, sondern wird von Wolken und Treibhausgasen (z.B. Kohlendioxid (CO_2) und Methan (CH_4)) zunächst absorbiert, dann teilweise in den Weltraum abgegeben und teilweise auf die Erde zurückgestrahlt. Dadurch entsteht eine zusätzliche Erderwärmung, die das Temperaturniveau auf der Erde um etwa 33° erhöht. Insofern ist der Treibhauseffekt für das Leben auf der Erde von essentieller Bedeutung, da ansonsten eine durchschnittliche Temperatur von minus 18° vorherrschen würde.

Es ist mittlerweile in der Wissenschaft nahezu unumstritten, dass zwischen der Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre und der globalen Durchschnittstemperatur eine positive Korrelation existiert. Diese Erkenntnis geht zurück bis auf Studien[6] des schwedischen Physikers und Chemikers Svante Arrhenius[7], der berechnete, dass eine Verdoppelung des CO_2-Gehaltes der Atmosphäre zu einer Temperaturerhöhung von 4-6 Grad führen könnte.

Mittlerweile sind die Erkenntnisse über das Strahlungsverhalten von Gasen in der Physik theoretisch erforscht und im Labor nachgewiesen. Entsprechend den Strahlungsgesetzen ist bekannt, dass drei- oder mehratomige Moleküle die Wärmestrahlung wieder zurückwerfen. Dazu gehören die sogenannten Treibhausgase Kohlendioxid (CO_2), Wasserdampf (H_2O), Ozon (O_3) und Methan (CH_4). Sie repräsentieren etwa ein Prozent der Erdatmosphäre. Demgegenüber lassen die drei größten Bestandteile der Atmosphäre, also Stickstoff (N_2, Volumenanteil: 78,9 Prozent) und Sauerstoff (O_2, Volumenanteil: 20,1 Prozent) und Argon (Volumenanteil 0,9 Prozent) die Wärmestrahlung ungehindert passieren. Bei diesen drei Gasen handelt es sich um zwei- bzw. einatomige Moleküle, die infrarote Strahlung nicht absorbieren können und somit nichts zum Treibhauseffekt beitragen.

Etwa seit den 1950er Jahren sind die Absorptionsspektren von CO_2 ziemlich genau erfasst. Kohlendioxid kann vor allem langwellige Strahlung absorbieren und wieder abgeben, das heißt vor allem Wärmestrahlung. Dadurch kann man ermitteln, wie viel Wärmestrahlung bei einer

[6] Arrhenius 1896

[7] Im Jahr 1903 erhielt Svante Arrhenius *„… in Anerkennung des außerordentlichen Verdienstes, das er sich durch seine Theorie über die elektrolytische Dissoziation um die Entwicklung der Chemie erworben hat*“ den Nobelpreis für Chemie

bestimmten CO_2-Konzentration wieder zurückgestrahlt wird. Man kann somit abschätzen um wieviel Grad sich die Temperatur bei einer Erhöhung der CO_2-Konzentration in der Luft erhöht. Aufgrund von Rückkopplungseffekten (höhere Temperatur, somit höherer Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre, somit noch höhere Temperatur) kann der Effekt größer ausfallen

Nach dem zweiten Weltkrieg nahm die Zahl der Studien zu diesem Thema rapide zu. Dies lag unter anderem an der zunehmenden Internationalisierung der Forschungsaktivitäten, der Entwicklung von Computertechnologien und der Nutzung von Wettersatelliten. Als Beispiele seien die Keeling-Kurve, die den ersten Nachweis für einen Anstieg der CO_2-Konzentration zeigt (Internationales geophysikalisches Jahr 1957/58), die ersten Simulationsrechnungen mit Atmosphärenmodellen in den 1960er und 1970er Jahren sowie die, von französischen und russischen Wissenschaftlern, extrahierten Wostok-Eisbohrkerne, durch deren im Eis eingeschlossene Gasbläschen die Zusammensetzung der Atmosphäre über 420.000 Jahre hinweg rekonstruiert werden konnte (siehe dazu Uekötter 2019).

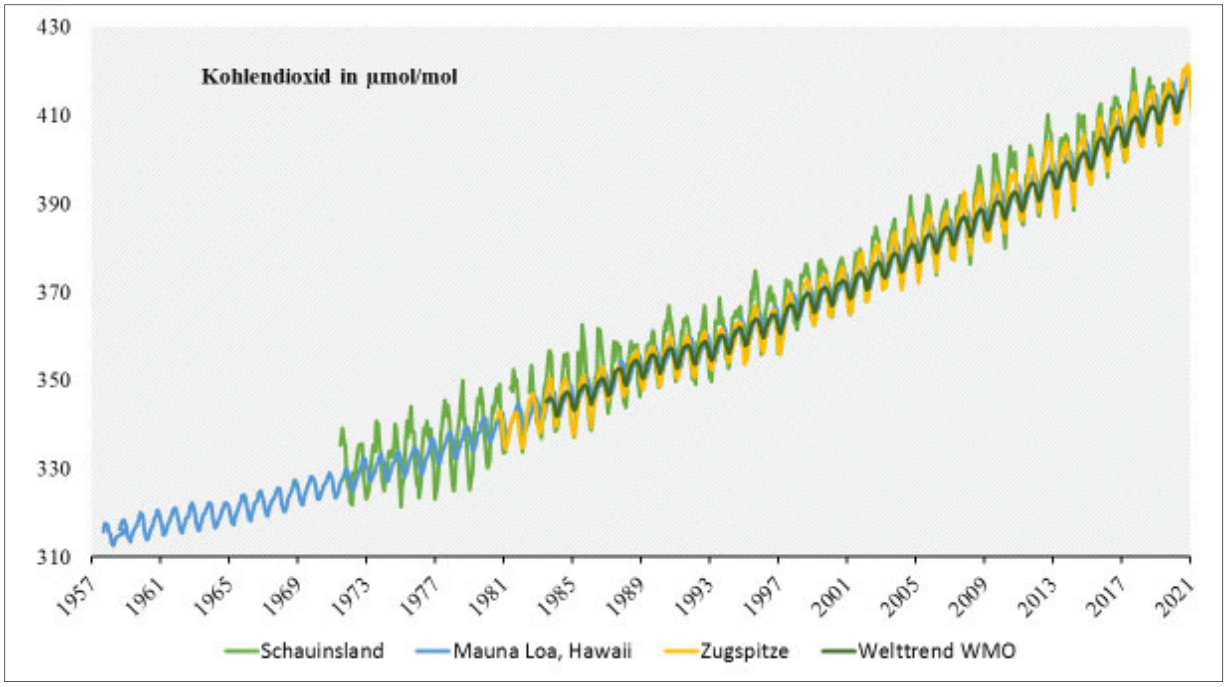

Abb. 5: Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre 1957-2021 (Monatsmittel)
Quellen: Umweltbundesamt (Schauinsland, Zugspitze), NOAA (Mauna Loa, Hawaii), World Meteorological Organization, WDCGG (Welttrend)

Das Global Atmosphere Watch (GAW) Programm der World Meteorological Organization (WMO) organisiert, koordiniert und betreibt ein weltweites System der Überwachung der chemischen Konzentration der Atmosphäre weltweit. Die Messstationen für globale CO_2-Messungen im Rahmen dieses Programmes sind in Tabelle 1 wiedergegeben.

Konkrete Messungen des Kohlendioxidgehalts der Atmosphäre existieren seit 1957 (Keeling-Kurve durch Messungen auf Mauna Loa auf Hawaii), in Deutschland seit Beginn der 1970er Jahre (Zugspitze und Schauinsland). Die Messdaten (Abb. 5) zeigen für Deutschland einen Anstieg von etwa 330 ppm auf mehr als 410 ppm im Jahr 2020. Der globale Durchschnittswert ist von 340 ppm (1983) auf 410 ppm (2020) angestiegen[8].

Messstation	**Land**	**(Teil-)Kontinent**
Assekrem /Tamanrasset	Algerien	Afrika
Cape Verde Atmospheric Observatory	Kap Verde	Afrika
Amsterdam Island	Frankreich	Afrika
Mt. Kenya	Kenia	Afrika
Cape Point	Südafrika	Afrika
Izaña	Tenerifa, Spanien	Afrika
La Réunion	Frankreich	Afrika
Cape Grim	Australien	Australien
Mt. Waliguan	China	Asien
Bukit Kototabang	Indonesien	Asien
Minamitorishima	Japan	Asien
Danum Valley	Malaysia	Asien
Nepal Climate Observatory - Pyramid	Nepal	Asien
Lauder	Neuseeland	Ozeanien
Mauna Loa	Hawai, USA	Ozeanien
Samoa	Samoa, USA	Ozeanien
Ushuaia	Argentinien	Südamerika
Alert	Kanada	Nordamerika
Barrow	USA	Nordamerika
Pallas/Sodankylä	Finnland	Europa
Zugspitze/ Hohenpeissenberg	Deutschland	Europa
Mace Head	Irland	Europa
Monte Cimone	Italien	Europa
Ny Ålesund/Zeppelin Mountain	Norwegen	Europa
Jungfraujoch	Schweiz	Europa
Puy de Dôme	Frankreich	Europa
Sonnblick	Österreich	Europa
Neumayer	Deutschland	Antarktis
South Pole	USA	Antarktis
Halley	Vereinigtes Königreich	Antarktis

Tab. 1: Messstationen des Global Atmosphere Watch - Programmes
Quelle: World Meteorological Organization

[8] Das Kürzel ppm (parts per million) steht für die Zahl 10^{-6} und wird in der Wissenschaft für den millionsten Teil verwendet.

Zur Zeit der Entdeckung von Svante Arrhenius, also zu Beginn des letzten Jahrhunderts, war ein Nachweis des Zusammenhangs zwischen CO_2-Konzentration und Lufttemperatur aufgrund fehlender Messdaten über einige Jahrzehnte hinweg nicht möglich. Mittlerweile gibt es aber in der Wissenschaft immer mehr Hinweise darauf, dass der zunehmende Ausstoß von Treibhausgasen durch die Nutzung fossiler Energieträger, Intensivierung landwirtschaftlicher Produktion, Abholzung von großer Waldflächen u.a. im Rahmen der Industrialisierung zu einer kritischen Erhöhung der globalen Temperaturen führt. Im IPCC-Sonderbericht über die Folgen einer globalen Erwärmung um 1,5 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau[9] und die damit verbundenen globalen Treibhausgasemissionspfade stellt das IPCC folgende Wahrscheinlichkeitsaussagen fest (IPCC 2018, S. 8)[10]:

*„Den langfristigen Erwärmungstrend seit vorindustriellen Zeiten widerspiegelnd, lag die beobachtete mittlere globale Oberflächentemperatur in dem Jahrzehnt 2006–2015 um 0,87 °C (**wahrscheinlich** zwischen 0,75 °C und 0,99 °C) höher als der Durchschnitt für den Zeitraum 1850–1900 (**sehr hohes Vertrauen**). Die geschätzte anthropogene globale Erwärmung stimmt mit dem Ausmaß der beobachteten Erwärmung innerhalb von ±20 % (**wahrscheinlicher Bereich**) überein. Die geschätzte anthropogene globale Erwärmung nimmt derzeit aufgrund von vergangenen und aktuellen Emissionen pro Jahrzehnt um 0,2 °C (**wahrscheinlich** zwischen 0,1 °C und 0,3 °C) zu (**hohes Vertrauen**).“*

[9] Unter der vorindustriellen Periode wird meistens (z.B. in den IPCC-Berichten) der Zeitraum von1850-1900 verstanden. Dieser Sprachgebrauch ist historisch betrachtet nicht korrekt, da die Industrialisierung bereits früher begann (Deutschland seit 1830, England seit dem Ende des 18. Jahrhunderts). Wir werden hier aus Gründen der Übersichtlichkeit diesen Sprachgebrauch beibehalten.

[10] Die Arbeitsgruppen des IPCC beschreiben geschätzte Wahrscheinlichkeiten für Ergebnisse oder Ereignisse in folgenden Kategorien:

- praktisch sicher (Eintrittswahrscheinlichkeit: > 99 Prozent),
- äußerst wahrscheinlich (Eintrittswahrscheinlichkeit: > 95 Prozent),
- sehr wahrscheinlich (Eintrittswahrscheinlichkeit: > 90 Prozent),
- wahrscheinlich (Eintrittswahrscheinlichkeit: > 66 Prozent),
- eher wahrscheinlich als nicht (Eintrittswahrscheinlichkeit: > 50 Prozent),
- unwahrscheinlich (Eintrittswahrscheinlichkeit: < 33 Prozent),
- sehr unwahrscheinlich (Eintrittswahrscheinlichkeit: < 10 Prozent),
- äußerst unwahrscheinlich (Eintrittswahrscheinlichkeit: < 5 Prozent).

Eine quantitative Zuverlässigkeitsskala umfasst folgende Kategorien:

- sehr hohes Vertrauen (die Aussage ist in mindestens 9 von 10 Fällen richtig),
- hohes Vertrauen (die Aussage ist in etwa 8 von 10 Fällen richtig),
- mittleres Vertrauen (die Aussage ist in etwa 5 von 10 Fällen richtig),
- geringes Vertrauen (die Aussage ist in etwa 2 von 10 Fällen richtig),
- sehr geringes Vertrauen (die Aussage ist in weniger als 1 von 10 Fällen richtig).

2.3 Das Klimasystem

Das Klima der Erde wird hauptsächlich durch die Sonneneinstrahlung auf die Erdoberfläche geprägt. Darüber hinaus sind aber die Wechselwirkungen zwischen den Komponenten des Klimasystems bedeutsam. Zu den Hauptbestandteilen des Klimasystems gehören die:

- Hydrosphäre (Ozeane, Seen, Flüsse),
- Atmosphäre (Luft),
- Kryosphäre (Eis und Schnee),
- Pedosphäre und Lithosphäre (Böden und festes Gestein),
- Biosphäre (Lebewesen auf dem Land und in den Ozeanen).

Im Zusammenspiel dieser Elemente erfolgen Reaktionen auf Veränderungen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Intensitäten. Die Reaktionen können verstärkend, aber auch abschwächend wirken.

Wir betrachten dazu zwei Beispiele (UBA 2008):

a) In der Strahlungsbilanz der Erde spielen große Eis- und Schneeflächen, z.B. in der Arktis, eine bedeutende Rolle, da sie ein erheblich höheres Reflexionsvermögen (Albedo von etwa 50-90 Prozent) aufweisen als Erdböden und Ozeane (Albedo von etwa 10-20 Prozent). Das bedeutet, dass normalerweise ein großer Teil der einfallenden Sonnenstrahlung reflektiert wird. Erwärmt sich nun die Atmosphäre, so dass Teile der Arktis schmelzen, verringert sich die Albedo der Erdoberfläche. Da weniger Sonnenstrahlung reflektiert wird, kann sich der Boden noch mehr erwärmen. Dies führt wiederum zu einem weiteren Anstieg der Lufttemperatur. Innerhalb des Klimasystems entsteht ein sich selbst verstärkender Rückkopplungseffekt. Taut ein Teil der Arktis aufgrund der Klimaerwärmung, wird diese Erwärmung durch die positive Rückkopplung weiter verstärkt. Andererseits würde sich bei einer zunehmenden Eis- und Schneedecke auf der Erde die globale Albedo erhöhen mit der Folge einer der stärkeren Reflexion der Sonnenstrahlung. Die dadurch entstehende Abkühlung würde wiederum die Eis- und Schneebildung verstärken. Eine solche Situation wird von Wissenschaftlern für die Zeit vor etwa 750 bis 580 Mio. Jahren (Präkambrium) vermutet (Hypothese der „Schneeball-Erde“), die erst aufgrund eines starken Vulkanismus, mit hohem CO_2-Ausstoß beendet worden sein soll.

b) Zwischen den Tropen und den Breiten oberhalb des nördlichen Wendekreises besteht ein ständiges Energieungleichgewicht. In den Tropen wird mehr Sonnenenergie aufgenommen, als vom Erdsystem wieder in den Weltraum abgestrahlt wird, es entsteht also ein

Energieüberschuss. In höheren Breiten wird mehr Energie in den Weltraum abgestrahlt als von der Sonne aufgenommen wird, somit existiert ein Energiedefizit. Dieses Energieungleichgewicht zwischen den Tropen und höheren Breiten führt zu einem Wärmetransport, der in Form von großräumigen Zirkulationssystemen auftritt. In den Tropen und Subtropen erfolgt dieser Wärmetransport in Form der sogenannten Hadley-Zirkulation. In dieser Hadley-Zirkulation steigt feuchtwarme Luft in Äquatornähe innerhalb von hochreichenden Gewitterstürmen auf, strömt in einer Höhe von etwa 15 km langsam polwärts, sinkt in den Subtropen als trockene Luft ab und strömt in Bodennähe zurück Richtung Äquator. Dabei wird die vom Äquator wegwehende Höhenströmung durch den sogenannten Corioliseffekt (Folge der Erdrotation) nach rechts (Osten) abgelenkt und erzeugt so die subtropischen Strahlströme (Jetstreams). In ähnlicher Weise wird die bodennahe Strömung in Richtung Äquator nach Westen abgelenkt und erzeugt so die Passatwinde. Die trockene, absinkende Luft in den Subtropen verhindert Wolkenbildungen und Regen. Sie ist deshalb mitverantwortlich für die in dieser Klimazone typischen Trockenzonen. Ein in den letzten Jahren immer häufiger beobachteter Hinweis auf den Klimawandel ist eine polwärts gerichtete Ausdehnung der Hadley-Zirkulation und somit eine Verschiebung der subtropischen Trockenzonen in Richtung der mittleren Breiten (z.B. Lucas u.a. 2013). Für Regionen, die bisher noch (mühsam) Landwirtschaft betreiben konnten, könnte dieser Wandel hin zu weniger Regen und trockenem Klima in Zukunft dramatische Konsequenzen haben[11].

2.4 Mögliche Folgen des Klimawandels

Im aktuellen IPCC-Bericht werden wahrscheinliche Konsequenzen einer zunehmenden Erderwärmung über 1,5° Celsius im Vergleich zum Zeitraum 1850 bis 1900 wie folgt beschrieben (IPCC 2021, S. 15):

*„Belege, die Änderungen in manchen Klima- und Wetterextremen einer globalen Erwärmung um 0,5 °C zuordnen, stützen die Bewertung, dass eine Erwärmung um weitere 0,5 °C gegenüber heute mit zusätzlichen nachweisbaren Veränderungen dieser Extreme einhergeht (**mittleres Vertrauen**). Untersuchungen ergeben, dass mit einer Erwärmung von bis zu 1,5 °C gegenüber vorindustriellem Niveau einige regionale klimatische Veränderungen eintreten werden, darunter eine Erhöhung extremer Temperaturen in vielen Regionen (**hohes Vertrauen**),*

[11] Die derzeit vorliegenden Beobachtungsdaten sind allerdings noch nicht sehr umfassend, so dass die Studien zur Ausdehnung des Tropengürtels zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen führen (zwischen 3 und 0,4 Breitengrade pro Jahrzehnt). Außerdem ist die Grenzziehung zwischen Tropen und Außertropen nicht eindeutig festgelegt.

*Zunahmen der Häufigkeit, Intensität und/oder Menge an Starkniederschlag in einigen Regionen (**hohes Vertrauen**) sowie eine Zunahme der Intensität oder Häufigkeit von Dürren in manchen Regionen (**mittleres Vertrauen**).“*

Als direkte Folgen des Klimawandels werden in der Literatur häufig genannt:

- steigende Maximal- und Minimaltemperaturen,
- Zunahme von langanhaltender Trockenheit und Dürre,
- Rückgang des Festlandeises auf Grönland und der Antarktis, höhere Meerestemperaturen und somit steigender Meeresspiegel,
- zunehmende Starkniederschläge (Starkregen und Hagel) und Zunahme heftiger tropischer Wirbelstürme,
- Gletscherschwund und Gletscherrückgang,
- tauender Permafrost mit zunehmender Freisetzung von Klimagasen.

Die genannten Folgen können in den verschiedenen Regionen in unterschiedlicher Intensität auftreten. Daraus ergeben sich je nach Region entsprechend unterschiedliche indirekte Folgen für die Menschheit und Umwelt, z.B.:

- Zunahme der Hunger- und Wasserkrisen insbesondere in Entwicklungsländern,
- Existenzbedrohung durch Überschwemmungen (weltweit),
- Existenzbedrohung durch Trockenheit und Waldbrände (weltweit),
- Gesundheitsrisiken durch Zunahme von Hitzeextremen (weltweit),
- wirtschaftliche Folgen für die Beseitigung der Klimafolgeschäden (weltweit),
- weitere Verbreitung von Schädlingen und Krankheitserregern (weltweit),
- Verlust an Biodiversität durch geringe Anpassungsgeschwindigkeit von Flora und Fauna.

Viele der genannten indirekten Folgen treffen die Entwicklungsländer besonders hart. Sie verfügen kaum über die Mittel, entstandene Schäden zu beseitigen, vorsorgenden Katastrophenschutz zu betreiben und wirtschaftliche Anpassungen, z.B. in den Bereichen Landwirtschaft, Energie, Tourismus, vorzunehmen.

Sind die oben beschriebenen Folgen des Klimawandels heute bereits erkennbar? Wie sind die langen Hitzeperioden der vergangenen Jahre in Deutschland (z.B. 2018, 2019, 2022) oder die Hochwasserkatastrophen in Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen einzuordnen? Sind dies Einzelphänomene oder bereits die Auswirkungen des Klimawandels? Eine Studie des Deutschen Wetterdienstes für Deutschland aus dem Jahr 2020 kommt zu folgendem Ergebnis: „*Die Autoren und Herausgeber bewerten die Entwicklung im Bereich der Temperaturen übereinstimmend als eindeutig und wissenschaftlich abgesichert sowie in den Folgen als sehr gravierend. Im Bereich der Niederschläge und der Winde sind die Aussagen differenzierter und*

weniger eindeutig. In Folge der rasch fortschreitenden Erwärmung des Klimasystems gibt es inzwischen eine deutliche Zunahme extrem hoher Temperaturen, in einigen Gegenden Deutschlands sind langanhaltende Phasen mit Tageshöchsttemperaturen von 30 Grad Celsius und darüber ein neues Phänomen. Es ist davon auszugehen, dass sich die globale Erwärmung mit den hier beschriebenen Auswirkungen in den kommenden Dekaden fortsetzen und damit verschärfen wird. Dieses bewirkt eine zunehmende Neigung zu Tagen mit hohen Temperaturen bei gleichzeitiger Abnahme der Neigung zu Tagen mit niedrigen Temperaturen. Neue Temperaturrekorde werden wahrscheinlicher. Dabei ist zu berücksichtigen, dass es im Rahmen der natürlichen Variabilität weiterhin auch kalte Winter, kühle Sommer und die Gefahr von Spätfrösten geben wird. Die Wahrscheinlichkeit für diese drei genannten Ereignisse nimmt jedoch in Folge der globalen Erwärmung ab."

Für Deutschland sind somit einige Aspekte des Klimawandels durchaus messbar (z.B. Hitzetage, Höchsttemperaturen, längere Trockenperioden). Diese Risiko-Fakten sollten für die Politik Anlass genug sein, Vorbeuge- und Gegenmaßnahmen in Angriff zu nehmen. Welcher Teil der Bevölkerung das mittelfristige Bedrohungspotenzial für Deutschland allerdings so hoch einschätzt, dass auch einschneidende Maßnahmen gegen den Klimawandel mitgetragen werden, ist nicht exakt vorhersagbar. Dafür müssten die Klimafolgen in Deutschland über einen längeren Zeitraum noch sichtbarer werden.

Weltweit kann das Bedrohungspotenzial des Klimawandels als deutlich höher eingeschätzt werden. Beispielsweise gehen aktuelle Klimaprojektionen von einer Erhöhung des Meeresspiegels bis zur Jahrhundertwende in der Größenordnung von 43 bis 84 cm aus (DKK, KDM 2019); hinzu kommt die Tendenz zu größeren Sturmfluten in dicht besiedelten Küstengebieten. Dieser Anstieg, der in etwa auch für die deutschen Nord- und Ostseegebiete gilt, ist für Deutschland bewältigbar, da für Vorsorgemaßnahmen wahrscheinlich genügend Zeit und finanzielle Mittel verfügbar sind. Küstengebiete in Afrika, Asien und Südamerika mit einer Vielzahl von Millionenstädten sind demgegenüber erheblich stärker gefährdet. Teilweise liegen jetzt schon Städte wie Djakarta und Tokio unter dem Meeresspiegel, weil der Untergrund wegen zu hoher Entnahme des Grundwassers stark abgesunken ist. Diese Situation wird sich mit großer Wahrscheinlichkeit in den nächsten Jahrzehnten verschärfen. Nicht zu vergessen ist die Gefahr, dass einige Inselgruppen zur Jahrhundertwende wahrscheinlich nicht mehr existieren werden. Es ist anzunehmen, dass die Nachrichten über weltweite Extremwetterereignisse erheblich zunehmen werden.

Es ist in verschiedenen Studien der Versuch unternommen worden, mögliche Schäden der Klimafolgen zu beziffern. (z.B. UBA 2020). Allerdings ist der zu betrachtende Zeithorizont

sehr lang, die Annahmen beruhen überwiegend auf Wahrscheinlichkeitsaussagen und die zugrundeliegenden ökonomischen Modellkonzeptionen sind häufig nicht ausgereift. Insofern sind die Aussagen über die Höhe wirtschaftlicher Folgen mit großer Vorsicht zu interpretieren.

Kipppunkte im Klimasystem

Wie oben bereits beschrieben entsteht das globale Klima in einem vernetzten System von Hydrosphäre (Ozeane, Seen, Flüsse), Atmosphäre (Luft), Kryosphäre (Eis und Schnee) sowie Pedosphäre und Lithosphäre (Böden und festes Gestein). Dadurch können Rückkopplungseffekte entstehen, die ab einer bestimmten Situation (sogenannte Kipppunkte) selbstverstärkend wirken. Ein mögliches Beispiel ist die Eis-Albedo-Rückkopplung in der Antarktis, und Grönland (vgl. Kap. 2.3)

Ab einem bestimmten Ausmaß des globalen Temperaturanstiegs ist die Belastung des Klimasystems so hoch, dass ein Umkehrprozess über einen Zeitraum von Jahrhunderten nicht mehr möglich ist. Dann können auch gezielte und umfassende Gegenmaßnahmen erst nach sehr langen Zeiträumen zu Umkehrprozessen führen. Die Vorhersage von solchen Kipppunkten ist allerdings nach derzeitigem Stand der Wissenschaft nur prinzipiell möglich, nicht aber die konkrete Angabe des auslösenden Temperaturniveaus bzw. der genaue Zeitpunkt des Eintretens.

Das Abschmelzen der europäischen Gletscher scheint allerdings bereits unumkehrbar zu sein. Erwartet wird vom IPCC auch ein langfristiges Schmelzen der Polkappen, steigende Temperaturen und Meeresspiegel sowie die Versauerung der Ozeane. Ein weiterer bedeutsamer Kipppunkt kann das Auftauen des Permafrostbodens[12] mit zunehmender Freisetzung von Methan und Kohlendioxid sein.

[12] Ein Permafrost- bzw. Dauerfrostboden weist in mindestens zwei aufeinanderfolgenden Jahren eine Temperatur unter null Grad Celsius auf. Der Untergrund kann dabei aus Gestein, Sedimenten oder Erde bestehen und dabei unterschiedlich große Eismengen enthalten.

Zwischenfazit:

1) Die Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre ist in den vergangenen Jahrzehnten angestiegen. Dies ist zumindest für die letzte Klimaperiode (1991- 2020) aufgrund der mittlerweile hohen Genauigkeit der Messungen nicht zu bezweifeln.
2) Der überwiegende Teil der Wissenschaft vermutet einen linearen Zusammenhang zwischen der CO_2-Konzetration und der Lufttemperatur.
3) Der aktuelle Anstieg der CO_2-Konzetration kann nicht auf natürliche Ursachen (Erdbahn, Erdrotation, Vulkanismus) zurückgeführt werden.
4) In der Wissenschaft wird überwiegend der Einfluss des Menschen auf die erhöhte Konzentration von Treibhausgasen angesehen.
5) Das IPCC benennt mögliche Folgen des Klimawandels, wie z.B. die Erhöhung extremer Temperaturen, die Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Starkniederschlägen sowie der Anstieg der Intensität oder Häufigkeit von Dürren in verschiedenen Weltregionen. Erste konkrete Hinweise auf solche Veränderungen sind weltweit beobachtbar.
6) Das Klimasystem ist sehr komplex und noch nicht vollständig erforscht. Die Existenz von Kipppunkten wird als sehr wahrscheinlich vermutet. Allerdings ist die genaue Vorhersage solcher Kipppunkte derzeit noch nicht möglich.

3 Weltweiter Ausstoß von Treibhausgasen

Mittelweile hat sich weltweit in der Wissenschaft, Politik und Gesellschaft überwiegend die Überzeugung durchgesetzt, dass:

- es global und regional erkennbare klimatische Veränderungen gibt,
- der menschengemachte Treibhauseffekt einen wesentlichen Einfluss auf diesen klimatischen Wandel hat,
- bei einer ungebremsten Fortsetzung des derzeitigen Ausstoßes von Treibhausgasen es langfristig zu sehr großen Klimaveränderungen kommen wird, die die Menschheit in Form von Naturkatastrophen, nachhaltiger Erhöhung des Meeresspiegels, regionale Dürreperioden u.a. belasten werden.

Diese Erkenntnis ist im Laufe der letzten Jahrzehnte in den meisten Ländern gewachsen und hat zu weltweiten Vereinbarungen geführt, die diesen Klimawandel bremsen oder gar aufhalten sollen. Die aktuell bekannteste Vereinbarung ist anlässlich der Weltklimakonferenz in Paris im Jahr 2015 von 197 Staaten getroffen worden. Sie ist im Jahr 2015 in Kraft getreten, nachdem sie von 55 Staaten, die mehr als 50% des Ausstoßes von Treibhausgasen repräsentierten, ratifiziert wurde (mittlerweile haben 180 Staaten das Abkommen ratifiziert)

Die Ziele der Vereinbarung sind in Artikel 2 formuliert. Die teilnehmenden Länder streben dort an, „ *...dass:*

a) der Anstieg der durchschnittlichen Erdtemperatur deutlich unter 2 °C über dem vorindustriellen Niveau gehalten wird und Anstrengungen unternommen werden, um den Temperaturanstieg auf 1,5 °C über dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen, da erkannt wurde, dass dies die Risiken und Auswirkungen der Klimaänderungen erheblich verringern würde;

b) die Fähigkeit zur Anpassung an die nachteiligen Auswirkungen der Klimaänderungen erhöht und die Widerstandsfähigkeit gegenüber Klimaänderungen sowie eine hinsichtlich der Treibhausgase emissionsarme Entwicklung so gefördert wird, dass die Nahrungsmittelerzeugung nicht bedroht wird;

c) die Finanzmittelflüsse in Einklang gebracht werden mit einem Weg hin zu einer hinsichtlich der Treibhausgase emissionsarmen und gegenüber Klimaänderungen widerstandsfähigen Entwicklung.“

In Artikel 4 werden Zeithorizont und Umsetzung in den teilnehmenden Ländern beschrieben:

„(1) Zum Erreichen des in Artikel 2 genannten langfristigen Temperaturziels sind die Vertragsparteien bestrebt, so bald wie möglich den weltweiten Scheitelpunkt der Emissionen von Treibhausgasen zu erreichen, wobei anerkannt wird, dass der zeitliche Rahmen für das Erreichen des Scheitelpunkts bei den Vertragsparteien, die Entwicklungsländer sind, größer sein wird, und danach rasche Reduktionen im Einklang mit den besten verfügbaren wissenschaftlichen Erkenntnissen herbeizuführen, um in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts ein Gleichgewicht zwischen den anthropogenen Emissionen von Treibhausgasen aus Quellen und dem Abbau solcher Gase durch Senken auf der Grundlage der Gerechtigkeit und im Rahmen der nachhaltigen Entwicklung und der Bemühungen zur Beseitigung der Armut herzustellen.

(2) Jede Vertragspartei erarbeitet, übermittelt und behält aufeinanderfolgende national festgelegte Beiträge bei, die sie zu erreichen beabsichtigt. Die Vertragsparteien ergreifen innerstaatliche Minderungsmaßnahmen, um die Ziele dieser Beiträge zu verwirklichen.“

Wann der Höhepunkt der weltweiten Treibhausgasemissionen erreicht werden soll, ist nicht konkret angegeben *(„... so bald wie möglich“*), zudem sind keine Termine für Scheitelpunkte der Emissionen in den einzelnen Ländern vorgegeben. Das Gleichgewicht zwischen Treibhausgasemissionen und deren Abbau durch Senken (Treibhausgasneutralität) soll „*in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts“* erreicht werden. Konkret bedeutet dies wohl, irgendwann zwischen 2051 und 2099. Im zweiten Teil des Artikels 4 bleibt die Ausgestaltung der Reduktionsziele und Reduktionsmaßnahmen den am Vertrag teilnehmenden Ländern überlassen. Angesichts dieser relativ ungenauen Formulierungen in den Artikeln 2 und 4 ist die damalige Euphorie über die Ergebnisse des Pariser Abkommens erstaunlich.

Natürlich haben nahezu alle Länder die Klimaproblematik erkannt und akzeptiert. Allerdings lassen die bisherigen Erkenntnisse bezüglich der Ursachen, Folgen und Handlungsnotwenigkeit Spielraum für länderspezifische Interpretationen. Die Abwägung des sehr wahrscheinlichen, aber eher langfristigen Klimaproblems mit anderen kurzfristigen wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Herausforderungen kann deshalb zu sehr unterschiedlichen Umsetzungsintensitäten und Umsetzungsgeschwindigkeiten der erforderlichen Maßnahmen führen. Die Enttäuschung über die Fortschritte des Klimaabkommens von Paris in den nachfolgenden Jahren ist darum nicht verwunderlich.

In dem Beitrag der IPCC-Arbeitsgruppe I zum Sechsten Sachstandsbericht, der sich mit naturwissenschaftlichen Grundlagen beschäftigt (IPCC 2021), wird festgestellt, dass eine nahezu lineare Beziehung zwischen den kumulativen anthropogenen CO_2-Emissionen und der von ihnen verursachten globalen Erwärmung besteht. Je 1.000 Mrd. Tonnen kumulativer CO_2-Emissionen werde die globale Oberflächentemperatur wahrscheinlich um 0,27 °C bis 0,63 °C erhöht, wobei der beste Schätzwert bei 0,45 °C liegt[13].

Das Ziel den weltweiten Temperaturanstieg auf unter 1,5° gegenüber dem Durchschnitt des Zeitraums 1850 bis 1900 zu halten wird demzufolge nur dann erreicht werden können, wenn eine bestimmte Menge an Treibhausgasausstoß nicht überschritten wird (Klimabudget bzw. CO_2-Budget). Für diese Obergrenze sind im letzten IPCC-Bericht Werte angegeben worden, die mit verschiedenen Wahrscheinlichkeiten zum Erreichen des 1,5° (bzw. 2°) - Temperaturziels führen (Tabelle 2).

Globale Erwärmung zwischen den Zeiträumen 1850–1900 und 2010–2019 (in Grad Celsius)	**Historische Kumulative CO_2-Emissionen im Zeitraum 1850 bis 2019 (in Mrd. Tonnen CO_2)**				
1,07 (Schwankungsbreite: 0,8 – 1,3)	**2.390 (Schwankungsbreite: ± 240)**				
Zusätzliche globale Erwärmung ab Jahr 2020 bis die CO_2-Emissionen auf Null (netto) reduziert sind (in Grad Celsius)	**Restbudget an CO_2-Emissionen ab dem Jahr 2020 zur Erreichung der Klimaziele mit den Wahrscheinlichkeiten**				
	17 %	**33 %**	**50 %**	**67 %**	**83 %**
0,43 (bei 1,5° - Ziel)	**900**	**650**	**500**	**400**	**300**
0,93 (bei 2,0° - Ziel)	**2.300**	**1.700**	**1.350**	**1.150**	**900**
Anmerkung: Höhere oder niedrigere Reduzierungen bei anderen Treibhausgasen können die angegebenen Restbudgets um ± 240 Mrd. Tonnen CO_2 verändern.					

Tab. 2: Restbudgets zur Erreichung der Klimaziele
Quelle: IPCC (2019, S. 29, Tabelle SPM.2)

[13] Der lineare Zusammenhang wurde bereits in früheren IPCC-Berichten postuliert. Im sechsten Sachstandsbericht ist aber die Bandbreite der möglichen Temperaturerhöhung geringer ausgewiesen. Diese Bestätigung früherer Erkenntnisse wird im aktuellen Bericht mit „hohem Vertrauen“ angegeben (Bestätigung in 8 von 10 Fällen).

Wenn höchstens eine Restmenge von 300 Mrd. Tonnen CO_2 weltweit ausgestoßen wird, kann das 1,5°-Ziel mit einer Wahrscheinlichkeit von 83 Prozent erreicht werden (bei 400 Mrd. Tonnen CO_2 ist die Wahrscheinlichkeit 67 Prozent). Für das 2,0°-Ziel betragen die entsprechenden Werte 900 bzw. 1.150 Mrd. Tonnen CO_2. Der Unsicherheitsbereich, der angibt um wie viele Einheiten diese Beträge nach oben oder unten abweichen können, liegt nach Angaben des IPCC bei 240 Mrd. Tonnen CO_2.

Was bedeuten diese Zahlen in Bezug auf den aktuellen weltweiten CO_2-Ausstoß? Im Jahr 2020 betrugen die CO_2-Emissionen weltweit knapp 36 Mrd. Tonnen (Tabelle 3). Im Zeitraum 2011 bis 2020 waren es insgesamt 340 Mrd. Tonnen. Bei unverändertem Schadstoffausstoß reicht das Restbudget, das mit größter angegebener Wahrscheinlichkeit das Klimaziel von 1,5° realisierbar nennt, noch 9 Jahre. Selbst wenn bis zum Jahr 2030 der weltweite CO_2-Ausstoß halbiert würde, wären bereits 250 Mrd. Tonnen emittiert, die Restmenge beträgt dann 50 Mrd. Tonnen für alle Länder der Welt zusammen. Ob eine solche Reduktion im Zeitraum 2020 bis 2030 angesichts der Daten für den Zeitraum 2010 bis 2020 möglich ist, erscheint zudem äußerst unwahrscheinlich. Darum ist augenscheinlich, dass einige der teilnehmenden Länder ihre Maßnahmen faktisch an höheren Temperaturzielen ausrichten oder mit geringeren Eintrittswahrscheinlichkeiten kalkulieren.

Betrachten wir ein Rechenbeispiel. Nehmen wir an, dass das 2°-Ziel innerhalb von 50 Jahren (also bis 2070) erreicht werden soll. Dann dürfen bis zum Jahr 2070 bei einer Eintrittswahrscheinlichkeit von 83 Prozent noch insgesamt maximal 900 Mrd. Tonnen CO_2 weltweit emittiert werden, also im Durchschnitt 18 Mrd. Tonnen CO_2 pro Jahr[14]. Würde der Schadstoffausstoß im Zeitraum 2021 bis 2070 linear abnehmen, müssten – ausgehend von etwa 36 Mrd. Tonnen im Jahr 2020 - folgende Meilensteine an weltweiten CO_2-Emissionen erreicht werden:

- 2030: 28,8 Mio. t CO_2
- 2040: 21,6 Mio. t CO_2
- 2050: 14,4 Mio. t CO_2
- 2060: 7,2 Mio. t CO_2
- 2070: 0 Mio. t CO_2

Dieses Ziel ist ambitioniert, erscheint aber bei ernsthaften Anstrengungen weltweit machbar, da ein halbes Jahrhundert an technologischen Weiterentwicklungen möglich ist. Der größte

[14] Auf die Einbeziehung des Unsicherheitsbereiches von ± 220 Mrd. Tonnen CO_2 (Tabelle 2) wird aus Vereinfachungsgründen zunächst verzichtet.

Treibhausgasemittent China (Tabelle 3) plant beispielsweise eine Klimaneutralität bis zum Jahr 2060.

Wer trägt aber die größte Verantwortung für das Erreichen der Klimaziele?

- Die USA als größter Emittent bis zur Jahrtausendwende und Land mit dem höchsten kumulierten historischen CO_2-Ausstoß?
- Deutschland als größter CO_2-Emittent in der EU?
- China als größter CO_2-Emittent weltweit?
- Katar, Australien, Kanada, USA als Länder mit den höchsten CO_2-Ausstößen pro Kopf?
- Die wichtigsten Industrieländer des letzten Jahrhunderts, da sie bereits eine bedeutsame Menge aus Treibhausgasen emittiert haben?

Diese Frage ist nicht eindeutig objektiv zu beantworten. Das Gleiche gilt für die Frage nach dem besten Indikator:

- CO_2-Ausstoß insgesamt
- CO_2-Ausstoß je Einwohner eines Landes
- CO_2-Ausstoß je Einheit des Bruttoinlandsproduktes
- Primärenergieverbrauch / Endenergieverbrauch (gesamt und pro Kopf)
- Stromverbrauch (gesamt und pro Kopf)

Alle Indikatoren geben wichtige Hinweise zur Entstehung der Klimaproblematik und auch zur Bewertung der Lösungsansätze. Wir versuchen deshalb die Datenfülle etwas zu strukturieren. In Tabelle 3 ist der CO_2-Ausstoß weltweit sowie für die Länder dargestellt, die im Jahr 2020 die höchsten CO_2-Emissionen aufwiesen. Betrachtet wird der Zeitraum 1990-2020; das Jahr 2019 wird zusätzlich dargestellt, da aufgrund der Covid-19-Krise Reduzierungen des CO_2-Ausstoßes feststellbar waren, die nicht unbedingt den generellen Trend wiedergeben.

Das Jahr 1990 wird häufig als Ausgangsjahr verwendet bei Reduzierungszielen für den Schadstoff-Ausstoß. Beispielsweise wurde in der Weltklimakonferenz in Kyoto (1997) erstmals ein konkretes Reduzierungsziel genannt. Weltweit sollte der Ausstoß von CO_2 bis zum Zeitraum 2008-2012 um 5,2 Prozent gegenüber dem Jahr 1990 gesenkt werden. Die EU hatte sich damals verpflichtet eine Reduzierung von 8 Prozent zu erreichen, Deutschland eine Reduzierung von 21 Prozent. Die deutsche Verpflichtung war unter anderem dem hohen Anteil von Stein- und Braunkohle an der Stromerzeugung geschuldet. Sowohl die EU als auch Deutschland haben die gesetzten Ziele bis zum Jahr 2010 erreicht.

Rangfolge der 20 Länder, die im Jahr 2020 die höchsten CO_2-Emissonen aufwiesen	CO_2-Emissionen in Mio. Tonnen					
	1990	2000	2010	2019	2020	absolutes Wachstum 1990-2019
China	2.426	3.706	9.296	11.504	11.680	9.078
USA	5.067	6.004	5.572	5.036	4.535	-31
Indien	599	990	1.752	2.564	2.412	1.965
Russland	2.395	1.673	1.734	1.778	1.674	-617
Japan	1.163	1.241	1.221	1.139	1.062	-23
Iran	205	353	575	686	690	481
Deutschland	1.019	878	818	702	637	-317
Südkorea	271	484	599	663	621	392
Saudi-Arabien	173	265	488	593	589	420
Indonesien	165	297	403	645	568	481
Kanada	454	558	567	595	543	142
Brasilien	228	363	448	477	452	249
Südafrika	314	347	460	468	435	154
Mexiko	291	398	479	488	408	197
Türkei	150	227	311	414	405	263
Australien	278	355	408	414	386	136
Vietnam	21	57	157	328	322	308
Vereinigtes Königreich	588	552	502	359	314	-229
Italien	430	458	427	333	297	-98
Polen	373	313	329	313	293	-60
Summe	**16.610**	**19.519**	**26.548**	**29.499**	**28.324**	**12.890**
Anteil an den weltweiten Emissionen	**73,1%**	**75,5%**	**77,7%**	**77,8%**	**78,8%**	**84,9%**
Europäische Union (27)	**3.818**	**3.577**	**3.425**	**2.932**	**2.621**	**-886**
Anteil an den weltweiten Emissionen	**16,8%**	**13,8%**	**10,0%**	**7,7%**	**7,3%**	
Emissionen, weltweit	**22.728**	**25.847**	**34.181**	**37.911**	**35.963**	**15.183**

Tab. 3: Länder mit den höchsten energiebedingten Kohlendioxid-Emissionen
Quelle: EU (EDGAR) (2021)

Demgegenüber gab es in allen anderen Kontinenten Zuwächse des CO_2-Ausstosses. Die Gründe dafür waren vielfältig. Afrika und Südamerika haben – ausgehend von einem niedrigen Niveau – den Schadstoffausstoß erhöht, was für Länder mit einem niedrigen Entwicklungsniveau und hohem Bevölkerungswachstum (Tabelle 4) nachvollziehbar war. Nordamerika hat eine Steigerung von mehr als 10% verzeichnet; die USA hatten die Kyoto-

Vereinbarung nicht ratifiziert. Die höchste Steigerung gab es aber mit mehr als 8,5 Mrd. Tonnen CO_2 in Asien, insbesondere in China und Indien. Bei der Verabschiedung des Kyoto-Protokolls hatte kaum jemand absehen können, welchen immensen wirtschaftlichen Aufschwung insbesondere China[15] realisiert hat. Dieser Aufschwung hatte den positiven Effekt, dass die weltweite Zahl der Menschen in absoluter Armut – entsprechend den UNO-Zielen - unter die 1-Milliarden-Grenze gefallen ist. Andererseits hat insbesondere China dafür erhebliche Reserven an fossilen Brennstoffen, vor allem Kohle, mit entsprechendem Ausstoß an CO_2, genutzt (BDP, Sternfeld 2022).

Bevölkerung nach Kontinenten 1950, 2020 und 2100 (mittlere Prognosevariante, jeweils am 1. Juli)						
Kontinente / Jahr	**1950**	**1950**	**2020**	**2020**	**2100**	**2100**
	in Mio.	**Anteil**	**in Mio.**	**Anteil**	**in Mio.**	**Anteil**
Asien	1.379	55,2%	4.664	59,5%	4.674	45,2%
Afrika	228	9,1%	1.361	17,4%	3.924	37,9%
Europa	550	22,0%	746	9,5%	587	5,7%
Lateinamerika und Karibik	168	6,7%	652	8,3%	647	6,3%
Nordamerika	162	6,5%	374	4,8%	448	4,3%
Ozeanien	13	0,5%	44	0,6%	69	0,7%
Welt gesamt	**2.499**	**100,0%**	**7.841**	**100,0%**	**10.349**	**100,0%**

Tab. 4: Historische und prognostizierte Entwicklung der Weltbevölkerung
Quelle: United Nations (2022)

Mittlerweile hat sich die Struktur der weltweiten CO_2-Emissionen umfassend geändert. Während im Jahr 1990 Europa und Nordamerika mehr als die Hälfte der Emissionen verursachten, war es im Jahr 2020 nur noch ein Viertel. Der Anteil der Europäischen Union ist von 16,8 bis auf 7,3 Prozent, der deutsche Beitrag von 4,5 auf 1,8 Prozent gesunken. In Zukunft müssen, wollen und können die EU und Deutschland weitere Beiträge zur Bewältigung des Klimawandels leisten; ohne entsprechende Maßnahmen in Nordamerika und Asien kann aber nicht einmal das 2°-Ziel erreicht werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich die afrikanischen und einige asiatische Länder erst am Beginn des wirtschaftlichen

[15] China hat zum Zeitpunkt der Verabschiedung des Kyoto-Protokolls noch den Status eines Entwicklungslandes gehabt. Es will diesen Status weiterhin behalten, trotz ihres rasanten Wachstums in den letzten Jahren und ihres mittlerweile hohem Pro-Kopf-Einkommen. Der Status eines Entwicklungslandes würde China erlauben, sich mehr Zeit für die Erreichung der Klimaziele zu lassen.

Entwicklungsprozesses befinden und ihren Schadstoffausstoß zunächst noch steigern werden. Beispielsweise rechnet China mit dem Höhepunkt seiner CO_2-Emissionen erst kurz vor dem Jahr 2030 (BDP, Sternfeld 2022). Zudem ist insbesondere in Afrika bis zur nächsten Jahrhundertwende mit einem Anstieg der Bevölkerung um mehr als 2,5 Mrd. Menschen zu rechnen (Tabelle 4).

In Tabelle 5 sind für die 20 größten CO_2-Emittenten des Jahres 2020 die Indikatoren Kohlendioxid-Ausstoß absolut, pro Kopf der Bevölkerung und je 1000 US-Dollar reales Bruttoinlandprodukt ausgewiesen. Verglichen werden die Zahlen für die Jahre 1990 und 2020.

Rangfolge der Länder, die im Jahr 2020 die höchsten CO_2-Emissonen aufwiesen	**Mill. Tonnen CO_2 absolut**		**Tonnen CO_2 pro Kopf**		**Tonnen CO_2 pro 1000 US-$ BIP**	
	1990	**2020**	**1990**	**2020**	**1990**	**2020**
China	2426	11680	2,07	8,20	1,501	0,508
USA	5067	4535	20,07	13,68	0,502	0,229
Indien	599	2412	0,69	1,74	0,378	0,286
Russland	2395	1674	16,23	11,64	0,754	0,432
Japan	1163	1062	9,34	8,39	0,293	0,214
Iran	205	690	3,64	8,26	0,421	0,661
Deutschland	1019	637	12,88	7,72	0,350	0,150
Südkorea	271	621	6,32	12,07	0,500	0,284
Saudi-Arabien	173	589	10,63	16,96	0,258	0,382
Indonesien	165	568	0,91	2,09	0,200	0,182
Kanada	454	543	16,38	14,43	0,505	0,311
Brasilien	228	452	1,53	2,11	0,146	0,151
Südafrika	314	435	8,35	7,41	0,828	0,640
Mexiko	291	408	3,41	3,05	0,232	0,177
Türkei	150	405	2,79	4,83	0,221	0,169
Australien	278	386	16,32	15,22	0,525	0,309
Vietnam	21	322	0,30	3,27	0,180	0,403
Vereinigtes Königreich	588	314	10,28	4,66	0,337	0,112
Italien, San Marino, Vat.	430	297	7,53	5,03	0,207	0,128
Polen	373	293	9,82	7,71	0,864	0,239
Europäische Union 27	**3818**	**2622**	**9,09**	**5,91**	**0,315**	**0,141**
Welt	**22728**	**35963**	**4,27**	**4,62**	**0,433**	**0,282**

Tab. 5: Indikatoren für Länder mit den höchsten CO_2-Emissionen
Quelle: EU (EDGAR) (2021)

In nahezu allen Ländern ist der CO_2-Ausstoß je BIP (teilweise stark) gesunken. Dies weist auf eine effizientere Energienutzung innerhalb der letzten dreißig Jahre hin. Dies gilt auch für große Emittenten wie China, die USA und die Europäische Union. Allerdings konnte der Fortschritt bei der Energieeffizienz nur in Europa das starke Wirtschaftswachstum des gleichen Zeitraums so überkompensieren, dass er einen maßgeblichen absoluten Rückgang der CO_2-Emissionen bewirkte.

Neben den europäischen Ländern weisen auch die nordamerikanischen Staaten einen erkennbaren Rückgang des pro-Kopf-Emissionen auf. Allerdings gilt zu beachten, dass das Bevölkerungswachstum in Nordamerika in den vergangenen 30 Jahren erheblich höher ausfiel als in Europa. (Bundesinstitut für Bevölkerungsforschung 2022). Mittlerweile liegen die Emissionsdaten pro Einheit des realen BIP sowohl in der Europäischen Union, als auch in Deutschland deutlich unter dem Wert für die Welt insgesamt. Beim CO_2-Ausstoß pro Kopf nähert sich der EU-Wert stark dem Weltdurchschnitt an. Eine Ausnahme bildet Deutschland, das bei den absoluten und den pro-Kopf-Emissionen noch deutlich über den anderen EU-Ländern liegt (siehe auch Kap. 4).

Einen wesentlichen Einfluss auf die Entwicklung des Weltklimas werden die Emissionen in den USA (sehr hohes Niveau absolut und pro Kopf), China (sehr hohes Niveau absolut und pro Kopf) und Indien (stark ansteigende Niveaus) haben. Zu vernachlässigen ist auch nicht die weitere Entwicklung der Wirtschaft und Bevölkerung in Afrika. Prognosen weisen für Afrika ein Anstieg der Bevölkerung auf das Niveau der asiatischen Länder aus (Tabelle 4). Ob dieser Zuwachs in Verbindung mit einer angestrebten Steigerung des materiellen Lebensstandards in Afrika durch klimaneutrale Produktionsmethoden bewältigt werden kann, ist eine der wichtigen Fragen für die kommenden Jahrzehnte. Ohne eine finanzielle Unterstützung durch die Industrieländer, zu denen mittlerweile auch - zumindest faktisch - China gehört, wird dies nicht möglich sein. Neben dem erforderlichen Finanzvolumen ist allerdings auch der sinnvolle Einsatz dieser Mittel zu beachten. Erfahrungen mit früheren Entwicklungshilfemaßnahmen in afrikanischen Ländern zeigen, dass eine effizientere Organisation des Mitteleinsatzes erforderlich sein wird.

Verbleibendes Klimabudget

Wie in Tabelle 2 dargestellt, kann man den Klimawandel mit hoher Wahrscheinlichkeit auf das vereinbarte 1,5° bzw. 2° Ziel der Temperaturerhöhung gegenüber dem Zeitraum 1850-2020 begrenzen, wenn eine Obergrenze für die global noch möglichen CO_2-Emissionen eingehalten wird. Die Aufteilung dieses Restbudgets auf die Länder der Welt könnte nach international

vereinbarten Prinzipien erfolgen. Die Frage ist aber, was eine sinnvolle und gerechte Verteilung des Restbudgets ist. Dafür sind mehrere Aspekte zu diskutieren.

Zunächst müsste eine eindeutige internationale Vereinbarung über das angestrebte Restbudget existieren. Dieses hängt aber davon ab, welche Temperaturobergrenze zu welchem Zeitpunkt angestrebt wird. Betrachtet man die Formulierungen des Pariser Klimaabkommens, wird ein erstes Problem deutlich. In den Artikeln 2 und 4 wird weder ein Temperaturziel noch ein Zeitpunkt für Null-Nettoemissionen eindeutig angegeben, wie die Formulierungen „*deutlich unter 2° mit Anstrengungen 1,5° zu erreichen*“ und „*Gleichgewicht zwischen Emissionen aus Quellen und Abbau aus Senken bis zur zweiten Hälfte des Jahrhunderts*“ (Kap. 3) zeigen. Zudem ist nicht geklärt worden, auf der Basis welches Wahrscheinlichkeitsniveaus die Restbudgets bestimmt werden sollen. Bei einer häufig genannten Wahrscheinlichkeit von 50 Prozent sind Restbudgets von 500 (1,5°) und 1350 (2°) Mrd. t CO_2 erlaubt. Eine fünfzigprozentige Wahrscheinlichkeit entspricht aber beim Münzwurf den Realisierungen „Kopf“ oder „Zahl“ (oder drastischer ausgedrückt: „kann eintreten“ oder „kann nicht eintreten“ mit gleicher Wahrscheinlichkeit). Sinnvoller wäre sicherlich, die höchste - vom IPCC angenommene - Eintrittswahrscheinlichkeit von 83 Prozent zugrunde zu legen, die zu Restbudgets von 300 (1,5°) und 900 (2°) Mrd. t CO_2 führt (Tabelle 2). Die methodischen und normativen Annahmen für die Berechnung dieser Restbudgets und die zugehörigen Unsicherheitsintervalle erschweren aber eine genaue Festlegung der zu treffenden konkreten Maßnahmen.

Wenn die Eintrittswahrscheinlichkeit und der Zeitpunkt eindeutig geklärt sind, könnte man auf politischer Ebene festlegen, welches Restbudget in welchem Zeitraum global zur Verfügung steht. Dann ist die Frage der „Verteilungsgerechtigkeit“ des Restbudgets zu klären. Der deutsche Rat für Umweltfragen nennt dafür 5 mögliche Kriterien (Deutscher Umweltrat 2020, S. 48):

a) Das landesspezifische Restbudget entspricht dem Anteil der Bevölkerung des Landes an der Weltbevölkerung im Ausgangsjahr (z.B. 2020). Man geht also davon aus, dass jeder einzelne Mensch das quantitativ gleiche Anrecht auf weitere CO_2-Emissionen hat.
b) Zusätzlich zur Bevölkerungszahl werden die historischen kumulativen CO_2-Emissionen jedes Landes einberechnet. Man geht davon aus, dass die Anrechte auf gleiche CO_2-Emissionen pro Kopf bereits in der Vergangenheit bestanden haben.
c) Länder mit höherer Wirtschaftskraft (BIP pro Kopf) sollen die CO_2-Emissionen schneller und stärker reduzieren als Länder mit geringerer Wirtschaftskraft.

d) Um für Länder mit bislang geringerem Entwicklungs- und Wohlstandsniveau Entwicklungen auf der Basis fossiler Energien innerhalb des verbleibenden globalen Restbudgets zu ermöglichen, müssen Staaten mit hoher Wirtschaftskraft und hohen historischen CO_2-Emissionen ihre Schadstoffausstöße noch stärker reduzieren.

e) Die prozentuale Verteilung der Treibhausgase eines Basisjahres (z.B. im Jahr 2020) auf die Länder der Welt bleibt bei der Emissionsreduktion konstant. Das bedeutet, dass Staaten mit hohen Emissionen unabhängig von kumulierten historischen CO_2-Emissionen, Bevölkerungsgröße und Wohlstand weiterhin mehr ausstoßen dürfen als Staaten mit bisher geringeren Emissionen. Der landesspezifische Anteil an den Weltemissionen von CO_2 bleibt auch in Zukunft bestehen. Bevölkerungszahl und Wohlstand eines Landes spielen bei der Verteilung des Restbudgets keine Rolle.

Restbudgets einzelner Regionen für das 1,5° bzw. 2° - Ziel (Eintrittswahrscheinlichkeit 83%)						
	China	**USA**	**EU-27**	**Deutsch-land**	**Indien**	**Afrika**
a) Anteil an der Weltbevölkerung 2020	17,9%	4,2 %	5,5 %	1,0%	17,8 %	17,1 %
e) Anteil am CO_2-Ausstoß 2020	32,5 %	12,6 %	7,3 %	1,8 %	6,7 %	3,9 %
Restbudget in Mrd. t CO_2 nach a) und 1,5°-Ziel	53,6	12,7	16,8	3,1	53,3	51,6
Restbudget in Mrd. t CO_2 nach e) und 1,5°-Ziel	97,5	37,8	21,9	5,4	20,1	11,7
Restbudget in Mrd. t CO_2 nach a) und 2°-Ziel	160,8	38,1	50,4	9,3	159,9	154,8
Restbudget in Mrd. t CO_2 nach e) und 2°-Ziel	292,5	113,4	65,7	16,2	60,3	35,1
1,5°- Ziel: Bei einer Eintrittswahrscheinlichkeit von 83% dürfen global 300 Mrd. t CO_2 emittiert werden. 2°- Ziel: Bei einer Eintrittswahrscheinlichkeit von 83% dürfen global 900 Mrd. t CO_2 emittiert werden.						
beobachteter CO_2-Ausstoß 2020 (Mrd. t)	11,7	4,5	2,6	0,6	2,4	1,4
Anteil an den kumulierten Emissionen 1970-2020	18,3 %	20,2 %	14,1 %	3,7 %	3,9 %	3,3 %

Tab. 6: Restbudgets in Abhängigkeit von Temperaturzielen und Verteilungskriterien
Quelle: EU (EDGAR) (2021), IPCC (2021)

Die Kriterien a) und e) können auf der Basis der angestrebten Temperaturziele und zugehörigen Restbudgets quantifiziert werden (Tabelle 6). Betrachtet man den Fall des 1,5°-Ziels (mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit von 83 Prozent und ohne die Berücksichtigung von Schwankungsbreiten), dürfte China aufgrund des Bevölkerungskriteriums ab dem Jahr 2021

noch 53,6 Mrd. Tonnen CO_2 (= 17,9 Prozent von 300 Mrd. t) emittieren. Diese Menge würde nur noch knapp 5 Jahre reichen, wenn man Chinas Schadstoffausstoß des Jahres 2020 zugrunde legt. Soll die aktuelle Verteilung von Schadstoffemissionen erhalten bleiben (Fall e) könnte China noch 97,5 Mrd. Tonnen CO_2 (= 32,5 Prozent von 300 Mrd. t) emittieren, was noch knapp 9 Jahre reichen würde.

Ähnliche Aussagen gelten für die USA, die EU-27 und Deutschland (Tabelle 6). Dabei würden allerdings die verbleibenden Restbudgets aufgrund der Kriterien b) (historische Emissionen), c) (Wohlstandskriterium) und d) (Schutz von Entwicklungsländern) noch deutlich kleiner ausfallen. Der aktuellste Bericht des IPCC (2021) geht davon aus, dass im Zeitraum von 1850 bis 2019 weltweit 2.390 Mrd. Tonnen CO_2 (aufgrund der Nutzung fossiler Energien) emittiert wurden, bei einer Schwankungsbreite von ±240 Mrd. Tonnen. Die CO_2-Belastungen aufgrund von Landnutzungen sind hier außer Acht gelassen worden. Im Zeitraum 1970 bis 2020 belief sich der entsprechende kumulierte weltweite CO_2-Ausstoß auf etwa 1.320 Mrd. Tonnen (EU / EDGAR 2021); davon entfielen mehr als 50 Prozent auf China, die USA und die EU-27 (Tabelle 6).
Demgegenüber sind für Indien und die afrikanischen Länder gänzlich andere Aussagen bzgl. der Restbudgets zu erkennen. Nach dem Bevölkerungskriterium weisen Indien und Afrika CO_2-Restbudgets wie China auf; diese würden aber ausgehend von den jeweiligen Emissionen des Jahres 2020 in Indien noch mehr als 20 Jahre und in Afrika sogar mehr als 35 Jahre vorhalten. Bei Zugrundelegung des Kriteriums e) (aktueller Schadstoffausstoß-Anteil) würde das Restbudget in Indien und Afrika nur etwa 8 Jahre vorhalten. Da diese Länder/Regionen eher einen Zuwachs ihrer Wirtschaftsleistung anstreben, was somit auch zu steigenden Schadstoffemissionen führen kann, ist das Konfliktpotenzial offensichtlich. Eine Realisierung des 1,5° - Temperaturziels erscheint deshalb nahezu unmöglich.

Entschärft wird diese Problematik, wenn nur noch das 2°- Ziel angestrebt wird, da sich dann das verbleibende Restbudget von 300 auf 900 Mrd. Tonnen CO_2 verdreifacht. Dementsprechend könnte sich die Nutzungsdauer jeweiligen Restbudgets verdreifachen und damit ein größeres Zeitfenster für klimapolitische Maßnahmen ermöglichen. Allerdings wächst damit auch die Wahrscheinlichkeit, dass die negativen Folgen des Klimawandels gravierender ausfallen werden. Diese Risikoabwägung wird vermutlich in den Ländern und Regionen der Welt unterschiedlich ausfallen.

China strebt aktuell eine Klimaneutralität bis zum Jahr 2060 an. Der Höhepunkt der CO_2 – Emissionen soll noch vor dem Jahr 2030 erreicht werden. Emittiert China beispielsweise im

Zeitraum von 2020 bis 2030 (also innerhalb von 10 Jahren) jährlich (wie im Jahr 2020) 11 Mrd. Tonnen CO_2 und senkt in den folgenden 30 Jahren die Emissionen linear bis auf Null (bis zum Jahr 2060), würden die kumulierten Emissionen Chinas 275 Mrd. Tonnen CO_2 betragen. Dies ist weitaus höher als die chinesischen Restbudgets beim 1,5° bzw. 2°-Ziel, auch ohne Einbeziehung der Verteilungskriterien b), c) und d).

Die **Europäische Union** strebt bis zum Jahr 2030 eine Reduzierung der CO_2-Emissionen um 55 Prozent gegenüber dem Jahr 1990 an. Dies bedeutet, dass die EU den CO_2-Ausstoß auf höchstens 1,7181 Mrd. Tonnen (= 3,818•(1-0,55); siehe Tabelle 3) reduzieren will. Im Zeitraum von 2020 bis 2030 würden dann – bei linearer Reduzierung - von der EU etwa 21,7 Mrd. Tonnen CO_2 emittiert werden:

(Emissionen 2020 – Emissionen 2030) • 10 Jahre / 2 + 1,7181•10 =

$$(2{,}621 - 1{,}7181) \cdot 10 / 2 + 1{,}7181 \cdot 10 = 4{,}515 + 17{,}181 = 21{,}696.$$

Für das 1,5°-Ziel hätte die EU aber nur 16,8 Mrd. Tonnen CO_2 (Tabelle 6) bis zur angestrebten Klimaneutralität im Jahr 2050 zur Verfügung. Das europäische Restbudget wäre also bereits vor 2030 erschöpft. Dabei sind zusätzliche Reduzierungen aufgrund der Kriterien b), c) und d) außer Acht gelassen worden.

Somit kann in der EU nur noch das 2°-Ziel[16], das ein Restbudget von 50,4 Mrd. Tonnen CO_2 erlaubt, gelten. Bei einer linearen Reduzierung der geplanten Emissionen des Jahres 2030 und der vorgesehenen Klimaneutralität im Jahr 2050 würden etwa weitere 17 Mrd. Tonnen CO_2 in der EU emittiert:

(Emissionen 2030 – Klimaneutralität 2050) • 20 Jahre / 2 = 1,7181•10 = 17,181

Insgesamt würde die EU also bis zum Jahr 2050 etwa 39 (= 21,696 + 17,181) Mrd. Tonnen CO_2 ausstoßen. Das Ziel „*deutlich unter 2°*“ würde somit erreicht.

Die **Vereinigten Staaten von Amerika** streben bis zum Jahr 2030 eine Reduzierung der Kohlendioxidemissionen um 50 bis 52 Prozent im Vergleich zum Jahr 2005, in dem die Emissionen 5,873 Mrd. Tonnen betrugen, an. Es sollen somit im Jahr 2030 maximal 2,86 Mrd. Tonnen CO_2 (=5,873•(1-0,52)) ausgestoßen werden. Ausgehend von den Emissionen des Jahres 2020 (4,535 Mrd. Tonnen) würden dann die USA bis zum Jahr 2030 etwa 37 Mrd. Tonnen CO_2.emittieren:

[16] Alle Berechnungen erfolgen auf der Basis einer Erfolgswahrscheinlichkeit von 83 Prozent für die Einhaltung der Temperaturziele (Tabelle 2). Wenn der Klimawandel tatsächlich eine äußerst hohe Bedrohung für die Menschheit darstellt, wären Vorgaben aufgrund niedrigerer Wahrscheinlichkeiten (z.B. 67 oder 50 Prozent) nicht sinnvoll.

(Emissionen 2020 – Emissionen 2030) • 10 Jahre / 2 + 2,86 • 10 =

$$(4{,}535 - 2{,}86) \cdot 10 / 2 + 2{,}86 \cdot 10 = 8{,}375 + 28{,}6 = 36{,}975.$$

Selbst das Restbudget von 37,8 Mrd. Tonnen CO_2 für das 2°-Ziel (Tabelle 6) wäre im Jahr 2030 bereits aufgebraucht. Darum erscheint das 2°-Ziel für die USA kaum erreichbar, es sein den man rechnet mit geringeren Erfolgswahrscheinlichkeiten für das Temperaturziel.

Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die US-amerikanische Klimapolitik in der Vergangenheit – je nach Wahlergebnis – sehr unterschiedlich ausgerichtet war. Beispielsweise stand die Umweltpolitik unter der Präsidentschaft von Donald Trump in einem starken Gegensatz zur aktuellen Umweltpolitik unter Präsident Joe Biden. Ob die aktuellen Klimaziele der USA weiter Bestand haben werden, wird auch von der nächsten Präsidentschaftswahl abhängen. Dies gilt zwar prinzipiell auch für andere Länder; allerdings sind die USA nach wie vor einer der größten Treibhausgas-Emittenten, so dass ein möglicher Politikwechsel einen maßgeblichen Einfluss auf die Entwicklung des Weltklimas haben kann.

Zwischenfazit:

1) Global, kontinental und regional sind in den letzten 30 Jahren klimatische Veränderungen feststellar. Der menschengemachte Treibhauseffekt hat mit großer Wahrscheinlichkeit einen wesentlichen Einfluss auf diesen klimatischen Wandel.
2) Bei einer ungebremsten Fortsetzung des derzeitigen Ausstoßes von Treibhausgasen wird es mit großer Wahrscheinlichkeit langfristig zu weiteren größeren Klimaveränderungen kommen, die die Menschheit in Form von Naturkatastrophen, nachhaltiger Erhöhung des Meeresspiegels, regionale Dürreperioden u.a. belasten werden.
3) Die meisten Länder der Welt formulieren die Absicht den menschengemachten Ausstoß von Treibhausgasen zu senken. Ziel ist es den weltweiten Temperaturanstieg auf deutlich unter 2° (nach Möglichkeit unter 1,5°) im Vergleich zu einer für den Zeitraum 1850 bis 1900 ermittelten Durchschnittstemperatur zu begrenzen. Zur Erreichung dieser Klimaziele sind nationale Klimapläne und Klimamaßnahmen vorgesehen.
4) China ist als Folge seiner immensen wirtschaftlichen Entwicklung in diesem Jahrtausend, die überwiegend auf der Basis der Nutzung eigener fossiler Energien erfolgte, zum weitaus größten CO_2-Emittenten der Welt geworden. Auch in Bezug auf die pro-Kopf-Emissionen hat China mittlerweile die europäischen Länder überholt.
5) Um die Klimaziele mit einer realistischen Wahrscheinlichkeit erreichen zu können, dürften nur noch CO_2-Restbudgets ausgestoßen werden. Für das 1,5°-Ziel ist das Restbudget (etwa 300 Mrd. Tonnen) so gering, dass es auf der Basis der aktuellen weltweiten Emissionen realistischerweise nicht erreicht werden kann. Das Ziel „deutlich unter 2°“ erscheint in einigen Ländern – bei großen Anstrengungen - machbar, da hier ein Spielraum von bis zu 900 Mrd. Tonnen CO_2 weltweit möglich ist.
6) Welches Land welchen Anteil an den Schadstoffreduzierungen übernehmen soll, ist objektiv nicht eindeutig festlegbar. Darum gibt es in den einzelnen Ländern unterschiedliche Auffassungen über die Intensität der erforderlichen Maßnahmen (Beispiele: China, Indien, Entwicklungsländer, Industrieländer).
7) Die Europäische Union hat in den letzten 30 Jahren merkbare Anstrengungen unternommen, den ehemals hohen Ausstoß von Treibhausgasen (absolut, pro Kopf und je Einheit BIP) zu senken. Für die nächsten 30 Jahre sind weitere hohe Anstrengungen vorgesehen. Diese alleine werden aber das weltweite Klimaproblem nicht lösen. Wichtig werden die Strategien und Instrumente in China und den USA sein.

4 Deutscher Beitrag zur Lösung des Klimaproblems

Deutschland wies in den vergangenen Jahrzehnten immer den höchsten CO_2-Ausstoß in der Europäischen Union auf. Im Jahr 2020 waren es mit 625 Mill. Tonnen CO_2 etwa 25 Prozent der Emissionen aller 27 EU-Länder. Auch der pro-Kopf-Ausstoß ist höher als der EU-Durchschnitt, mittlerweile allerdings geringer als in China und deutlich niedriger als in den USA (Tabelle 5).

Gemessen am Anteil an der Weltbevölkerung dürfte Deutschland für die Realisierung des 1,5°-Zieles noch ein CO_2-Restbudget von 3,1 Mrd. Tonnen nutzen (beim 2°-Ziel noch 9,3 Mrd. Tonnen). Berücksichtigt man zusätzlich die historischen kumulierten CO_2-Emissionen und das Wohlstandsniveau Deutschlands, müsste das Restbudget noch geringer ausfallen. Deutschland hat das Pariser Klimaschutzabkommen aus dem Jahr 2015 unterzeichnet und die entsprechenden nationalen Ziele in einem Klimaschutzplan bzw. einem Klimaschutzgesetz festgelegt (Tabelle 7).

Vorgaben des Klimaschutzgesetzes vom 14.6.2021 (Anlage 2)

Emissionen von Treibhausgasen in Deutschland (in Mio. Tonnen CO_2 - Äquivalent)	**2020**	**2022**	**2030**
Energiewirtschaft	280	257	108
Industrie	186	177	118
Gebäude	118	108	67
Verkehr	150	139	85
Landwirtschaft	70	67	56
Abfallwirtschaft und Sonstiges	9	8	4
gesamt	803	757	438

Tab. 7: Geplante deutsche Treibhausgas-Emissionen im Zeitraum 2020-2030
Quelle: Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG), Anlage 2 (zu § 4)[17]

[17] Die Vorgaben des Klimaschutzgesetzes beziehen sich auf alle Treibhausgase: Kohlendioxid (CO2), Methan (CH_4), Dickstickstoffmonoxide (N_2O), Hydrofluorcarbon (HFCs), Perfluorcarbon (PFCs), Stickstofftrifluorid (NF_3), Schwefelhexafluorid (SF_6). Die Auswirkungen der verschiedenen Gase auf das Klima sind unterschiedlich. Beispielweise hat Methan einen stärkeren Einfluss als Kohlendioxid, wird allerdings schneller in der

Aufgrund der aktuellen Fassung des Klimaschutzgesetzes aus dem Jahr 2021 sollen die deutschen Treibhausgasemissionen (hauptsächlich CO_2, Methan und Distickstoffmonoxid) bis zum Jahr 2030 um mindestens 65 Prozent (gegenüber dem Jahr 1990) auf ein Niveau von höchstens 438 Mill. Tonnen gesenkt werden (Tabelle 7). Daraus kann man einen Maximalausstoß von CO_2 im Jahr 2030 von etwa 380 Mill. Tonnen ableiten. Ausgehend von einem tatsächlichen Ausstoß von 625 Mill. Tonnen Kohlendioxid im Jahr 2020 und bei linear verlaufenden Emissionsreduzierungen würden im Zeitraum 2020 bis 2030 insgesamt bereits etwa 5 Mrd. Tonnen CO_2 ausgestoßen:

(Emissionen 2020 – Emissionen 2030) • 10 Jahre / 2 + 380•10 =

(625 - 380) • 10 / 2 + 380 • 10 =

1225 + 3.800 = 5.025 Mill. t CO_2 (= 5,025 Mrd. t CO_2).

Die vorgesehene weitere Reduzierung auf 88 Prozent (auf etwa 110 Mill. Tonnen CO_2) bis zum Jahr 2040 führt zu einem weiteren Ausstoß von 1,2 Mrd. Tonnen; weitere 0,5 Mrd. Tonnen bis dann Klimaneutralität im Jahr 2045 erreicht werden soll. Insgesamt werden also bis etwa 6,3 Mrd. Tonnen Kohlendioxid emittiert werden. Damit könnte das 1,5°-Ziel in Verbindung mit dem Verteilungskriterium „Bevölkerungsanteil“ nicht einmal mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit von 50 Prozent („kann eintreten“ oder „kann nicht eintreten“ sind gleich wahrscheinlich) eingehalten werden.

Insofern liegen den deutschen Klimamaßnahmen anscheinend andere Zielsetzungen bzw. Restbudget-Verteilungskriterien zugrunde. In der Präambel des Klimagesetzes findet sich dementsprechend folgende Formulierung: „*Zweck dieses Gesetzes ist es, zum Schutz vor den Auswirkungen des weltweiten Klimawandels die Erfüllung der nationalen Klimaschutzziele sowie die Einhaltung der europäischen Zielvorgaben zu gewährleisten. Die ökologischen, sozialen und ökonomischen Folgen werden berücksichtigt. Grundlage bildet die Verpflichtung nach dem Übereinkommen von Paris aufgrund der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen, wonach der Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur* ***auf deutlich unter 2 Grad Celsius und möglichst auf 1,5 Grad Celsius*** *gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen ist, um die Auswirkungen des weltweiten Klimawandels so gering wie möglich zu halten.*“

Da 0,5 Grad bei den Temperaturzielen weltweit etwa 600 Mrd. Tonnen CO_2-Emissionen bedeuten (siehe Tabelle 2), ergibt sich bereits bei einem modifizierten Ziel von 1,8° Celsius,

---

Atmosphäre abgebaut. Zur besseren Vergleichbarkeit der Daten werden die Emissionen aller relevanten Treibhausgase in vergleichbare CO_2 -Mengen (CO_2-Äquivalent) umgerechnet.

das tatsächlich als „*deutlich unter 2° Celsius*“ bezeichnet werden kann, ein weltweites zusätzliches Restbudget von 360 Mrd. Tonnen CO_2, also insgesamt 600 Mrd. Tonnen CO_2. Für Deutschland würden sich nach dem Verteilungskriterium „Bevölkerungsanteil“ folgender erweiterte Spielraum ergeben, der zu den Vorgaben des Klimaschutzgesetzes passt:

(300 + 360) Mrd. t CO_2 • Anteil an der Weltbevölkerung = 660 • 0,01 = 6,6 Mrd. t CO_2.

Die politischen Entscheidungsträger in Deutschland haben somit anscheinend eine Risikoabschätzung unter Unsicherheit mit zwei Hauptaspekten vorgenommen:

a) Die im Klimaschutzgesetz vorgesehene Reduzierung der CO_2-Emissionen wird von der deutschen Regierung offenbar als umsetzbar angesehen. Eine stärkere Reduzierung, damit das 1,5°- Ziel mit hoher Wahrscheinlichkeit erreicht wird, scheint aber nicht mit „angemessenem“ Aufwand (finanziell, organisatorisch, technisch, sozialverträglich, u.a.) möglich zu sein. In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass der ursprüngliche Klimaschutzplan der Bundesregierung, der im Jahr 2016 im direkten Anschluss an das Pariser Klimaabkommen beschlossen und am 12.9.2019 als Klimaschutzgesetz verabschiedet wurde, sogar eine geringere Reduzierung vorsah (55 Prozent bis 2030) und Klimaneutralität erst 2050 erreichen wollte. Insbesondere die nicht vorhandene Konkretisierung, wie die Reduzierung nach dem Jahr 2030 erfolgen sollte, hat das Bundesverfassungsgericht in seinem Urteil vom 24.3.2021 kritisiert und mit Grundrechten als unvereinbar erklärt: „*Mit heute veröffentlichtem Beschluss hat der Erste Senat des Bundesverfassungsgerichts entschieden, dass die Regelungen des Klimaschutzgesetzes vom 12. Dezember 2019 (Klimaschutzgesetz <KSG>) über die nationalen Klimaschutzziele und die bis zum Jahr 2030 zulässigen Jahresemissionsmengen insofern mit Grundrechten unvereinbar sind, als hinreichende Maßgaben für die weitere Emissionsreduktion ab dem Jahr 2031 fehlen.“* Dies führte zu einer Novellierung des Gesetzes am 24.6.2021, in der neben der Konkretisierung der Reduktionsziele nach dem Jahr 2030 auch eine Erhöhung des Minderungsziels bis 2030 (65 Prozent gegenüber dem Jahr 1990) und eine Klimaneutralität bis zum Jahr 2045 festgelegt wurde.

b) Da augenscheinlich das 1,5°-Ziel mit den geplanten Maßnahmen nicht mit einer Wahrscheinlichkeit von 83 Prozent erreicht wird (global und national), hat man – ohne es direkt auszusprechen – das Ziel „deutlich unter 2 Grad Celsius“ – zugrunde gelegt. Dadurch werden erhöhte Risiken bezüglich der Klimafolgen in Kauf genommen. Allerdings sollte man dabei beachten, dass die Risiken (Meeresspiegelerhöhung, Naturkatastrophen, längere Dürreperioden, u.a.) in der Öffentlichkeit derzeit nur partiell als gegeben wahrgenommen

werden. Wann, in welchem Ausmaß und in welchen Regionen der Welt die Bedrohungspotenziale zum Tragen kommen, ist auch von der Wissenschaft nicht exakt vorhersagbar. Die einzelnen langfristigen Risiken werden aufgrund der Erkenntnisse der Klimaforschung immer wahrscheinlicher, sind aber kurzfristig immer noch stark überlagert von anderen aktuellen Problemen der Länder und Kontinente (Kriege, wirtschaftliche Aspekte, soziale Ungleichheit u.a.).

Die Abwägung dieser beiden Hauptaspekte durch die politischen Entscheidungsträger führt naturgemäß zu unterschiedlichen Reaktionen in der Bevölkerung. Manche sehen die Risiken des Klimawandels als absolut sicher und höchstbedrohlich an, so dass ihnen die bestehenden Maßnahmen als unzureichend erscheinen. Andere halten die Entscheidungen der Regierung für zumindest überzogen, weil einerseits das Risiko für Deutschland und Europa geringer erscheint als für andere Teile der Welt. Darüber hinaus wird häufig darauf hingewiesen, dass Europa alleine den Klimawandel nicht aufhalten kann, da es nur noch 10 Prozent der weltweiten Emissionen verantwortet. Allerdings wird das Problem des Klimawandels von der großen Mehrheit der Bevölkerung als existent angenommen. Darauf weist zumindest die Tatsache hin, dass im deutschen Bundestag und in den meisten Länderparlamenten 5 der 6 aktuell größten Parteien, und somit etwa 80-90 Prozent der Abgeordneten, die Existenz und die Gefahren des Klimawandels anerkennen.

Das Klimaschutzgesetz gibt nicht nur Reduzierungsverpflichtungen für die gesamten Treibhausgasemissionen vor. Es legt auch fest, in welcher Höhe in den Bereichen Energieerzeugung, Industrie, Gebäude; Verkehr, Landwirtschaft und Abfallwirtschaft, jährlich Reduzierungen der Schadstoffemissionen vorgenommen werden sollen (Tabelle 7). Diese Festlegung (und die zugehörigen im Gesetz beschriebenen Kontrollmechanismen) machen einerseits deutlich, dass die politischen Entscheidungsträger die Klimaproblematik ernsthaft angehen wollen und sich deshalb jährlich nachprüfbare Verpflichtungen auferlegt haben. Andererseits ist es bereits jetzt offensichtlich, dass einzelne Vorgaben des Gesetzes aus verschiedenen Gründen (äußere und innere Einflüsse) nicht in jedem Jahr eingehalten werden können. Wir betrachten dazu einige Beispiele.

Fallbeispiel 1: Stromerzeugung in Deutschland

Ein wesentlicher Grund für die – im europäischen Vergleich – hohen deutschen CO_2-Emissionen ist die Struktur der Stromerzeugung in Deutschland. Zumindest bis zum Jahr 1990 gab es in Deutschland die Zielsetzung, Strom hauptsächlich mit Kernenergie und (soweit wie

möglich) heimischer Kohle (Braunkohle und Steinkohle) zu erzeugen. Ihr Anteil an der Elektrizitätserzeugung lag im Jahr 1990 bei 87,4 Prozent. Die CO_2-relevanten fossilen Energieträger Steinkohle und Braunkohle hatten dabei einen Anteil von 56,7 Prozent an der Stromproduktion und führten 1990 zu einem Ausstoß von CO_2 in der Höhe von 318 Mio. Tonnen (Tabelle 8). Nachdem das letzte Kernkraftwerk in Deutschland im Jahr 1989 ans Netz gegangen war, wurde - nicht zuletzt als Konsequenz aus dem Kernkraftwerksunfall in Tschernobyl (Ukraine) im Jahr 1986 - auf Initiative der damaligen rot-grünen Regierung der Ausstieg aus der Stromerzeugung durch Kernenergie vertraglich (Bundesregierung und vier Kraftwerksbetreiber) vereinbart. In der Novelle des Atomgesetzes vom 22.4.2002 wurden entsprechend Restlaufzeiten (in TWh)[18] für 20 deutsche Kernkraftwerke festgelegt, in der Summe 2.623 TWh. Für einzelne Kernkraftwerke (z.B. Isar 2, Emsdetten und Neckarwestheim 2[19]) hätten die Restlaufzeiten eine Nutzung bis etwa zum Jahr 2030 erlaubt. Dieser Ausstieg ist von den nachfolgenden Bundesregierungen zweimal korrigiert worden. Im Jahr 2010 wurde die Laufzeit der Kernkraftwerke von der damaligen schwarz-gelben Regierung um etwa 8-10 Jahre verlängert. Nach dem Reaktorunfall von Fukushima im März des Jahres 2011 ist diese Verlängerung nicht nur zurückgenommen worden und der bereits geschlossene Vertrag wieder in Kraft getreten, vielmehr wurden acht Kernkraftwerke sofort abschaltet und für die restlichen Kraftwerke der Ausstieg auf das Jahr 2022 vorgezogen (13. Gesetz zur Änderung des Atomgesetzes vom 30.5.2011). Als Ersatz für die Stromerzeugung waren neben den bestehenden Kohlekraftwerken, der Ausbau der erneuerbaren Energien und die Nutzung von Erdgas (aus Russland, Norwegen und den Niederlanden) vorgesehen. Im Jahr 2010 betrug der Anteil von Steinkohle und Braunkohle an der Stromerzeugung noch 45 Prozent, hinzu kamen 14 Prozent aus der Nutzung von Erdgas. Insgesamt verursachten diese fossilen Energien CO_2-Emissionen in Höhe von 278 Mio. Tonnen. Im Jahr 2015 betrugen die Anteile noch 42 Prozent (Kohlen) und 9,5 Prozent (Erdgas) mit immer noch 271,3 Mio. Tonnen CO_2-Ausstoß. Seit dem Jahr 2011 stieg aber auch der Einsatz erneuerbarer Energien zur Stromerzeugung deutlich an (vorwiegend Windkraft an Land und Photovoltaik). Allerdings beläuft sich der CO_2-Ausstoß fossiler Energien im Jahr 2020 immer noch auf 158 Mio. Tonnen, also ein Viertel der gesamten deutschen CO_2-Emissionen (Tabelle 8).

Somit stand die deutsche Energiepolitik bis zum Jahr 2021 vor einem Dilemma. Einerseits wollte man schnell auf die Nutzung der Kernenergie (2022 anstatt 2030) verzichten, so dass

[18] Eine Terawattstunde (TWh) sind eine Milliarde Kilowattstunden.

[19] Es handelt sich um die drei Kernkraftwerke, die nach Beschluss der Bundesregierung spätestens am 31.3. 2023 vom Netz gehen sollen.

etwa 400 TWh Kernenergiestrom (Differenz aus der im Jahr 2002 vereinbarten Reststrommenge von etwa 2.600 TWh und der Stromerzeugung aus Kernenergie im Zeitraum 2002 bis 2022) anderweitig erzeugt werden mussten. Andererseits sollte auch der Einsatz von Steinkohle und Braunkohle zur Stromerzeugung bis zum Jahr 2030 erheblich reduziert werden; bis zum Jahr 2038 war der vollständige Verzicht auf Kohle vorgesehen (Kohleausstiegsgesetz vom Juli 2020). Mit dem Beginn des Ukraine-Krieges ist auch die Option einer „Übergangstechnologie Gaskraftwerke“ [20]wahrscheinlich mittelfristig nicht mehr möglich.

	1990	2000	2010	2019	2020
CO_2-Emissionen in Deutschland, gesamt (in Mio. Tonnen)					
CO_2 Kohlendioxyd	1.075	887	815	689	625
CO_2 ohne Landnutzungsänderung u. Forstwirtschaft	1.052	899	833	707	639
CO_2-Emissionen der Stromerzeugung (in Mio. Tonnen)					
Braunkohlen	200	157	151	113	91
Steinkohlen	118	118	95	44	32
Erdgas	18	22	32	34	35
Mineralöle	9	6	6	4	4
Müll (fossil)	4	6	8	9	9
Sonstiges (z.B. Gichtgas, Grubengas, Kokereigas)	17	17	20	18	16
Insgesamt	366	327	313	222	187
CO_2-Emissionen nach Quellkategorien (in Mio. Tonnen)					
A. Energiebedingte Emissionen	**989**	**839**	**784**	**660**	**595**
Verkehr	162	180	153	163	145
Haushalte	129	118	106	89	90
Kleinverbraucher (u.a. Dienstleistungen)	64	46	40	30	28
Verarbeitendes Gewerbe	185	129	125	122	115
Energiewirtschaft	424	355	352	246	208
Land-, Forstwirtschaft, Fischerei, Sonstige Emis.	26	11	10	9	9
B. Industrieprozesse, Lösemittel	**63**	**60**	**49**	**48**	**45**
C. Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft	**25**	**-12**	**-18**	**-18**	**-15**
Insgesamt	**1.077**	**887**	**815**	**689**	**625**

Tab. 8: CO_2-Emissionen in Deutschland nach Quellkategorien
Quelle: BMWK (2022)

Wenn Deutschland es schafft, auf die Stromerzeugung aus Braun- und Steinkohle bis zum Jahr 2030 vollständig zu verzichten, wäre dies ein maßgeblicher Beitrag, die geplante Verminderung

[20] Erdgas erzeugt bei der Verbrennung weniger Treibhausgase als Braun- und Steinkohle.

der Treibhausgasemissionen zu erreichen. Allerdings ist die einzige verbleibende Option der rigorose Ausbau der regenerativen Energien, und dies bei einem steigenden Strombedarf aufgrund der Klima-Anforderungen aus den Bereichen Mobilität und Gebäude.
Dennoch ist es in diesem Bereich möglich, die erforderlichen Maßnahmenpakete gesetzgeberisch auf dem Weg zu bringen und auch – allerdings mühsam – organisatorisch umzusetzen. Die Kosten sind zwar sehr hoch, aber zumindest relativ genau kalkulierbar; zudem sind die erforderlichen Einzelmaßnahmen durchaus planbar. Wie groß der Teil der Bevölkerung sein wird, der bereit ist, diese Kosten mitzutragen, ist schwer abzuschätzen. Insofern wird die Politik immer versuchen, diese „Energiewende" so „sozialverträglich" wie möglich zu gestalten, damit die Akzeptanz weitgehend erhalten bleibt. Allerdings können die Maßnahmen nicht allein über neue Schulden finanziert werden, da dadurch wiederum zukünftige Generationen stark belastet würden. Insofern ist aus dem zweifachen Dilemma nunmehr ein mindestens vierfaches Dilemma entstanden: Verzicht auf Kernenergie, Klimaschutz, Sozialverträglichkeit, nachhaltige Finanzpolitik.

Fallbeispiel 2: Mobilität (Verkehr)

Der Bereich Verkehr umfasst in den Abgrenzungen der Energiebilanzen den Straßen-, Schienen-, Schiff- und Luftverkehr. Zum Straßenverkehr zählen die private bzw. gewerbliche Nutzung von PKW und LKW in Haushalten und Unternehmen. Der Verkehrsbereich ist dadurch gekennzeichnet, dass in den vergangenen 30 Jahren (bis 2019) keine Reduzierung der CO_2-Emissionen feststellbar war (Tabelle 8). Energiesparendere Fahrzeuge haben zwar den Schadstoffausstoß je gefahrenem Kilometer reduziert, konnten aber nicht die Zunahme an Fahrzeugen und Fahrleistungen[21] (Personenkilometer, Tonnenkilometer) kompensieren. Gegenüber dem Jahr 2020 ist laut Klimaschutzgesetz eine Reduzierung der Treibhausgasemissionen um etwa 45 Prozent (von 150 auf 85 Mrd. Tonnen CO_2-Äquivalent) vorgesehen. Die dafür erforderlichen bzw. sinnvollen Maßnahmen werden in Deutschland kontrovers diskutiert, z.B.:

- der Vergleich von Aufwand und Nutzen eines Tempolimits,
- der Ersatz von Autos mit Verbrennungsmotoren (Benzin, Diesel) durch batteriebetriebene Fahrzeuge oder Autos mit Brennstoffzellen,
- die Möglichkeiten und Grenzen batteriebetriebene Fahrzeuge aufzuladen,

[21] Die Verkehrsleistung in Deutschland, gemessen an umgerechneten Personen- und Tonnenkilometern ist im Zeitraum 1990 bis 2020 um etwa 59 Prozent angestiegen.

- die Nutzung von E-Fuels[22],
- der Ausbau des öffentlichen Nahverkehrs sowie die Verlagerung von Transportkapazitäten von der Straße auf die Schiene.
- Die Gestaltung von Preisen im öffentlichen Nahverkehr, damit diese Angebote auch von der Bevölkerung umfassend wahrgenommen werden (z.B. 9- bzw. 49-Euro-Ticket).
- Der „angemessene“ Preis für Benzin und Diesel (Mineralölsteuer und CO_2-Steuer) sowie für Flugkraftstoffe, der zu nachhaltigen Einsparungen führt.

Im Gegensatz zum Bereich der Stromerzeugung ist allerdings kein konkreter Gesamtplan erkennbar, wie das Einsparungsziel bis zum Jahr 2030 (und danach) erreicht werden soll.

Ein generelles Tempolimit wäre beispielsweise durch die Regierung einfach einzuführen. Nach Berechnungen des Umweltbundesamtes (UBA 2020) würde die Einführung eines Tempolimits auf Bundesautobahnen die Treibhausgasemissionen jährlich um 1,9 (bei Tempolimit 130 km/h) bis 5,4 (bei Tempolimit 100 km/h) Millionen Tonnen verringern. Dies entspricht lediglich drei bis acht Prozent der vorgesehenen Emissionsreduzierung. Der Nutzen-Aufwand-Vergleich wird von den politischen Parteien und den gesellschaftlichen Gruppierungen in Deutschland unterschiedlich bewertet.

Der Ausbau des öffentlichen Nah- und Fernverkehrsverkehrs erscheint sinnvoll, ist aber angesichts der aktuellen Mängel der Schieneninfrastruktur und der erkennbaren organisatorischen Defizite der Deutschen Bahn nicht in einem Zeitrahmen von verbleibenden 8 Jahren (Stand 2022) möglich, sondern kann nur sehr langfristig geplant und umgesetzt werden. Dies ist eine große Herausforderung für die Bundes- und Landesregierungen.

In Bezug auf die Preisgestaltung im öffentlichen Personenverkehr wird derzeit versucht Anreize zu schaffen, die Bevölkerung zu einer verstärkten Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel zu bewegen. Das in der Mitte des Jahres 2022 zeitweise eingeführte 9 Euro-Ticket hat dazu beigetragen, dass öffentliche Verkehrsmittel verstärkt genutzt wurden. Die Maßnahme war Anlass für die politischen Entscheidungsträger, sich konkrete Gedanken über eine Preisgestaltung im öffentlichen Personenverkehr zu machen, die den Personenverkehr

---

[22] E-Fuels (electrofuel bzw. Elektro-Kraftstoff) werden synthetisch hergestellt. Aus Wasser (H_2O) wird Wasserstoff (H_2) gewonnen. Damit bei diesem Schritt kein zusätzliches Kohlendioxid (CO_2) in die Atmosphäre gelangt, muss der benötigte Strom aus erneuerbaren Energien kommen. Aus der Atmosphäre oder aus Produktionsanlagen wird CO_2 herausgefiltert. Über das Zwischenprodukt Methanol wird dann aus Wasserstoff und Kohlendioxid Treibstoff hergestellt.

nachhaltig von der Straße auf die Schiene verlagert (Einführung eines 49 Euro-Ticket im Jahr 2023). Allerdings müssten parallel dazu in ausreichendem Maße zuverlässige Fahrangebote bereitgestellt werden, was wiederum kurzfristig nicht möglich ist. Ähnliches gilt für die Verlagerung des Gütertransportes von der Straße auf die Schiene. Die Maßnahme kann mit Sicherheit helfen CO_2-Emissionen in großem Maße einzusparen; allerdings gibt es auch hier massive Kapazitätsprobleme (Schienennetz, Personal u.a.), so dass eine kurzfristige Umsetzung (bis zum Jahr 2030) nicht realistisch erscheint.

In Bezug auf den Umstieg von Benzin- und Dieselfahrzeugen auf Elektroautos sind zwei Aspekte zu berücksichtigen. Zum einen ist der erforderliche Strombedarf zu ermitteln. Dies ist rechnerisch relativ einfach möglich, da die Zahl der PKWs in Deutschland (etwa 45 Millionen), die durchschnittliche jährliche Fahrleistung je PKW (etwa 14.000 km/Jahr) und der Stromverbrauch von Elektroautos (zwischen 15 und 25 KWh je 100 km, je nach Fahrzeugtyp) bekannt sind. So kommt das Bundesumweltministerium zu der Feststellung: „*Wenn alle derzeit rund 45 Millionen Pkw auf deutschen Straßen weitgehend elektrisch fahren würden, so wären dafür gut 100 Terawattstunden (TWh) im Jahr nötig*.“[23] Diese Angabe des Ministeriums ist grundsätzlich nicht zu beanstanden, da sie näherungsweise zu den o.a. Basisdaten passt:

45.000.000 PKW • 14.000 km • 0,15 KWh/km = 94,5 TWh

45.000.000 PKW • 14.000 km • 0,25 KWh/km = 157,5 TWh.

Die Stromerzeugung in Deutschland müsste also um 15 bis 25 Prozent gegenüber dem Jahr 2020 ansteigen, wenn alle konventionell betriebenen PKWs durch Elektrofahrzeuge ersetzt werden sollen. Da bis zum Jahr 2030 nur etwa 20 Prozent des Fahrzeugbestandes aus Elektroautos bestehen soll, ist der kurz- bzw. mittelfristige Mehrbedarf an Strom noch relativ gering. Allerdings sollte nicht außer Acht gelassen werden, dass die Mehrproduktion an Strom nur noch auf der Basis von erneuerbaren Energien stattfinden soll. Die bereits oben erwähnte Problematik bei der Stromproduktion wird also noch verschärft.

Darüber hinaus ist derzeit noch keineswegs abschließend geklärt, wie die erforderliche Ladeinfrastruktur (Schnellladung, Normalladung) in relativ kurzer Frist im gewünschten Ausmaß bereitgestellt werden kann. Nach Angaben der Bundesnetzagentur waren am 1. November 2022 60.229 Normalladepunkte und 11.862 Schnellladepunkte in Betrieb (siehe auch Statista 2022). Zum gleichen Zeitpunkt waren etwa 860 Tausend Elektrofahrzeuge angemeldet (siehe auch Statista 2022). Bis zum Jahr 2030 sollen nach Absicht der Bundesregierung etwa eine Million Ladepunkte öffentlich und diskriminierungsfrei zugänglich

[23] https://www.bmuv.de/themen/luft-laerm-mobilitaet/verkehr/elektromobilitaet/strombedarf-und-netze

sein. Grundlage ist der „Masterplan II Ladeinfrastruktur“ aus dem Jahr 2022, der einen generellen Rahmen für die Umsetzung der erforderlichen Maßnahmen und das Monitoring setzen soll. Die Zahl der Ladepunkte ist ausgerichtet an der geplanten Zahl von Elektroautos bis zum Jahr 2030 (etwa 7-10 Millionen). Die Zielsetzung erscheint zum heutigen Zeitpunkt ambitioniert; die Weiterführung nach 2030 bis zum Jahr der Klimaneutralität im Jahr 2045 ist nicht konkretisiert. In diesem Zusammenhang sei nur auf zwei Problembereiche hingewiesen. Zum einen erfordert die Bereitstellung der Ladekapazität hohe Anstrengungen im technischen und organisatorischen Bereich. Ob diese Ressourcen (Material und Personal) bis zum Jahr 2030 in erforderlichem Umfang zur Verfügung stehen können, wird derzeit noch untersucht. Das grundsätzliche Potenzial für Ladestationen für die geplanten 7-10 Millionen Elektroautos bis 2030 ist durchaus vorhanden. In Deutschland gibt es etwa 16 Millionen Einfamilienhäuser, die für private Ladepunkte besser geeignet sind als Mietshäuser für drei und mehr Familien in Innenstädten. Aufgabe der kommunalen Politik und Energieversorger wird es sein, hierfür die technische und organisatorische Infrastruktur bereitzustellen. Darüber hinaus muss der Staat finanzielle Anreize für die Umstellung auf E-Mobilität bereitstellen.

Der zweite Aspekt betrifft die ökologischen Folgen einer Nutzung von batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen. Zu klären ist die Verfügbarkeit der erforderlichen Rohstoffe (Lithium, Kobalt, Grafit, Nickel, Platin, seltene Erden) und die Nachhaltigkeit ihres Abbaus in anderen Ländern (z.B. China, Südamerika), aber auch die umweltverträgliche Entsorgung verwendeter Batterien. Recyclingverfahren für Lithium-Ionen-Antriebsbatterien sind bereits bekannt und verfügbar; Kupfer, Kobalt, Nickel und Lithium können aus Batterien zurückgewonnen werden. Allerdings ist noch nicht abschließend geklärt, wie die langfristig erforderlichen Mengen an Batterien (für Deutschland bis zu 45 Millionen) produziert und entsorgt werden können (Fraunhofer-Institut 2018). Studien gehen davon aus, dass die erforderlichen Rohstoffe (Lithium, Kobalt, Grafit und Nickel, Platin) – auch bei einem weltweiten Anstieg der Nachfrage – prinzipiell verfügbar sind (Agora Verkehrswende 2017). Regionale und temporäre Engpässe sowie die sozialen Probleme des Abbaus - insbesondere in afrikanischen und südamerikanischen Ländern – werden zwar angedeutet, aber nicht ausführlich diskutiert.

Es wäre sinnvoll, den Bereich der Mobilität mit allen seinen Aspekten zunächst vollständig zu durchleuchten, danach realistische Planungen vorzunehmen und letztendlich im Rahmen der verfügbaren Kapazitäten umzusetzen. Der derzeit – selbst gesetzte – Zeitdruck für ambitionierte Ziele ist hierbei nicht unbedingt hilfreich. Das Nichterreichen dieser Ziele erscheint wahrscheinlich und kann die Glaubwürdigkeit einer Klimapolitik beeinträchtigen.

Ähnliche Problemfelder existieren im Bereich der Gebäude. Es wird nicht möglich sein, innerhalb von 8-10 Jahren den Bestand an Wohnungen energetisch so zu erneuern, dass eine Einsparung von 51 Mrd. Tonnen an Treibhausgasen, also mehr als 40 Prozent, bis zum Jahr 2030 möglich ist (Tabelle 7). Entsprechende Einsparvorgaben bei Neubauten sind dafür nicht ausreichend; den existierenden Altbaubestand energetisch umzurüsten erscheint nach aktuellem Stand technisch, organisatorisch und personell schwierig bis kaum möglich. Zudem gibt es bereits heute einen akuten Mangel an zusätzlichen Wohnungen, der durch die Zunahme an Flüchtlingen aus akuten Krisengebieten, z.B. Ukraine, noch verschärft werden kann. Ob die geplanten ökonomischen Anreize zum Energiesparen (CO_2-Steuer) den gewünschten Effekt erzielen werden, ist noch offen. Angesichts derzeit hoher Inflationsraten wird das Thema der „Sozialverträglichkeit“ von Maßnahmen immer bedeutsamer.

Zwischenfazit:

1) Deutschland weist den höchsten CO_2-Ausstoß aller Länder der europäischen Union auf. Auch die pro-Kopf-Emissionen liegen über dem EU-Durchschnitt.
2) Deutschland hat in den vergangenen 30 Jahren den CO_2-Ausstoß um mehr als 40 Prozent verringert. Allein der vorgesehene Ausstieg aus fossiler Energie zur Stromerzeugung kann erheblich dazu beitragen, das Ziel einer Reduzierung um 65 Prozent bis zum Jahr 2030 zu erreichen.
3) Die in Deutschland diskutierten Klimamaßnahmen, die unter anderem im Klimaschutzgesetz festgelegt sind, reichen nicht aus, dass 1,5°-Ziel der Erderwärmung zu erreichen; es ist aber möglich – auf der Basis der vorliegenden Zahlen – einen Beitrag für das das Ziel „deutlich unter 2°“ zu realisieren.
4) Die für Deutschland vorgesehenen Klimamaßnahmen werden, auch wenn sie vollständig realisiert werden, nicht das weltweite Klimaproblem alleine lösen. Dafür ist der Anteil Deutschlands an den weltweiten Emissionen zu gering.
5) Die Realisierung der Einsparungsziele im Bereich der Stromerzeugung sind eventuell, aber nur mit einem hohen finanziellen und organisatorischen Aufwand, möglich.
6) In den Bereichen Mobilität und Gebäude ist derzeit eine gezielte Strategie nicht erkennbar. Es ist sehr wahrscheinlich, dass die im Klimaschutzgesetz vorgesehene Ziele bis zum Jahr 2030 nicht erreicht werden.

5 Strategien und Instrumente zur Lösung der Klimaproblematik

5.1 Effizienz-, Konsistenz- und Suffizienz-Strategien

Für die Bewältigung der Klimaprobleme und ihrer Folgen werden grundsätzlich drei Strategiemöglichkeiten diskutiert: Effizienz, Konsistenz und Suffizienz. In Bezug auf das Ziel einer Reduzierung der Treibhausgasemissionen bis hin zur Klimaneutralität führen diese Strategien zu unterschiedlichen Maßnahmen.

- Die **Effizienz-Strategie** zielt darauf ab, ein bestimmtes ökonomisches Ergebnis, z.B. gemessen durch das BIP eines Landes, mit möglichst geringem Energieeinsatz und Schadstoffausstoß zu erstellen. Effizienzstrategien setzen damit überwiegend an der Produktions- und Angebotsseite an. Es geht vorrangig um die Steigerung der Energieeffizienz, z.B. gemessen am Energieeinsatz je Einheit des BIP, die auch zu geringeren Produktionskosten führen kann und wirtschaftlich durchaus erstrebenswert ist. Im Vordergrund der zugehörigen Maßnahmen stehen somit im Wesentlichen Verbesserungen bzw. Weiterentwicklungen bereits vorhandener Technologien. Beispiele hierfür sind unter anderem:
  a) Die Entwicklung von Fahrzeugen mit geringerem Kraftstoffverbrauch bis hin zu Elektroautos.
  b) Die Wärmedämmung in Gebäuden bis hin zum Niedrigenergie- oder Nullenergiehaus.
  c) Energiesparendere Anlagen zur Erzeugung von Raum- und Prozesswärme.

  Die Steigerung der gesamtwirtschaftlichen Energieproduktivität (Bruttoinlandsprodukt / Energieverbrauch) gehört beispielsweise zu den Zielsetzungen der deutschen Nachhaltigkeitsstrategie. Allerdings führen diese Entwicklungen zwar zu einer Reduzierung des Energieverbrauchs, insbesondere von fossilen Energieträgern, und der Treibhausgasemissionen. Sie reichen aber nicht aus, um das Ziel der vollständigen Klimaneutralität zu erreichen, da dann die Netto-Emissionen den Wert Null annehmen müssen (Kap. 3). Dafür wären Technologien erforderlich, die in den Bereichen Mobilität, Gebäude, Landwirtschaft und Industrie die Nutzung fossiler Energien vollständig ersetzen.
- Die **Konsistenz-Strategie** zielt auf eine umweltgerechte, im Sinne von schadstofffreie, Nutzung von Energieressourcen ab. Dies bedeutet letztlich, dass nahezu ausschließlich regenerative Energieträger (Wind, Sonne, Erdwärme, Wasserstofftechnologien) in allen Bereichen (Industrie, Verkehr, Gebäude, Landwirtschaft) genutzt werden. Letztendlich sind es auch hier (weitergehende) technologische Entwicklungen, die zur Klimaneutralität führen. Die Klimaproblematik kann aber nach aktuellem Stand nicht mehr durch eine Entkopplung von Wachstum (Wirtschaft und Bevölkerung) und Luftschadstoffemissionen

gelöst werden, da nur noch ein festes Budget an Treibhausgasemissionen möglich ist (Tabelle 2). Somit muss ab einem bestimmten Zeitpunkt der Ausstoß an Schadstoffen auf nahezu Null reduziert werden. Die klassische Effizienz-Strategie wird gezwungenermaßen durch die Konsistenz-Strategie ersetzt werden müssen. Dies kann bei anderen ökologischen Problemfeldern, z.B. der Abfallproblematik, durchaus anders bewertet werden. Die Umsetzung der Konsistenz-Strategie kann allerdings zu Konflikten innerhalb der Gesellschaft führen. Beispielsweise kann der Bau von Windkraft- und Solaranlagen zu Kontroversen mit anderen Umweltschutzaspekten, z.B. dem Arten- und Landschaftsschutz führen.

- Die **Suffizienz-Strategie** stellt den geringeren Verbrauch an Energie (und Material) durch eine geringere Nachfrage nach Gütern und Dienstleistungen mit hohem Ressourcenanteil in den Mittelpunkt. Die Suffizienz-Strategie setzt damit primär an der Nachfrage- bzw. Konsumseite an. Bezogen auf das Beispiel der Mobilität bedeutet dies beispielsweise die Vermeidung unnötiger Autofahrten bis hin zum Verzicht auf ein eigenes Auto in Verbindung mit dem Umstieg auf öffentliche Verkehrsmittel oder Carsharing-Konzepte. Im Kontext der Energieversorgung läuft die Suffizienz u.a. auf den weitgehenden Verzicht von energieintensiven Gütern hinaus sowie die Reduzierung der persönlichen Wohnfläche. Sie beinhaltet auch eine Änderung des Konsums von Lebensmitteln, z.B. durch Reduzierung oder Verzicht auf Fleischprodukte, die wegen des hohen Methanausstoßes und der Abholzung des klimafreundlichen Regenwaldes die Treibhausgasproblematik verschärfen. Die Suffizienz-Strategie ist daher im Bereich des materiellen Konsums mit Selbstbeschränkungen und einer Befriedigung von Bedürfnissen mit weniger Gütern verbunden. Damit sind bei der Umsetzung soziale Konflikte nicht ausgeschlossen. In Bezug auf die Klimaproblematik kann die Suffizienz-Strategie nicht der ausschließliche Lösungsansatz sein, da wegen der angestrebten Klimaneutralität der Konsum von Gütern nahezu gänzlich eingestellt werden müsste. Allerdings erscheint eine Kombination von Konsistenz- und Suffizienz-Strategien durchaus möglich.

5.2 Instrumente zur Bekämpfung des Klimawandels

Die überwiegende Meinung in der Wissenschaft besagt, dass

- ein Klimawandel bereits eingetreten ist und auch erste Folgen bemerkbar sind,
- eine Reduzierung von gravierenden Folgen für die Menschheit nur dann möglich sind, wenn bis zur Mitte der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts eine Klimaneutralität erreicht wird.

Obwohl die zugrundeliegenden wissenschaftlichen Erkenntnisse überwiegend Wahrscheinlichkeitsaussagen sind und somit Klimafolgen, Kipppunkte, Klimaschäden nicht mit absoluter Sicherheit vorausgesagt werden können, wird das Risiko in großen Teilen der weltweiten Gesellschaften und Regierungen so hoch eingeschätzt, dass ein Handlungsbedarf als dringend erforderlich angesehen wird. Insofern sind die Beschlüsse des Pariser Klimaabkommens, trotz aller Kritikpunkte, als das Ergebnis ernsthafter Erkenntnisse anzusehen. Es gibt aber große Unterschiede zwischen Strategien und Maßnahmen der einzelnen Länder. Zum einen werden die Aktualität und das Ausmaß der Risiken unterschiedlich eingeschätzt, so dass die Abwägung zwischen erforderlichem Aufwand und Nutzen nicht immer in gleicher Weise erfolgt. Zudem werden alternative Strategien zur Lösung der Klimaproblematik unterschiedlich bewertet. Dies wird an mehreren Beispielen erläutert.

Fallbeispiel 1: Stromerzeugung

Strom ist der wichtigste Energieträger in entwickelten Volkswirtschaften. Ein Leben ohne Strom ist in der heutigen Welt nahezu undenkbar. Hinzu kommt, dass die Nutzung von Elektrizität (Wärme, Antrieb, chemische Prozesse) schadstofffrei erfolgt. Allerdings beruht die Stromerzeugung bis heute zu einem großen Teil auf fossilen Brennstoffen, von denen insbesondere Stein- und Braunkohle wegen der hohen CO_2-Emissionnen stark zum Treibhauseffekt beitragen. Der Handlungsbedarf (weltweit und national) ist somit offensichtlich. Strom muss in Zukunft frei von Treibhausgasen erzeugt werden. Aktuell sind dafür zwei technische Lösungen möglich:

- Stromerzeugung durch regenerative Energien,
- Stromerzeugung durch die friedliche Nutzung von Atomkraft. [24]

In Bezug auf die Nutzung der Kernenergie können weltweit drei Gruppen von Ländern identifiziert werden:

a) Länder, die vollständig aus der Kernenergie aussteigen wollen, z.B. Deutschland und Italien,
b) Länder, die ihre existierenden Kernkraftwerke weiterlaufen lassen, zum Teil mit einer Verlängerung der Laufzeiten, z.B. die USA,
c) Länder, die ihre Kraftwerkskapazitäten noch weiter ausbauen wollen, z.B. Frankreich, China und Indien.

[24] Die Möglichkeit, durch Kernfusion Strom zu erzeugen wird hier nicht betrachtet, da die sich Technik immer noch im Anfangsstadium befindet. Seit mehr als einem halben Jahrhundert hat man – vergebens - die Hoffnung, dass Kernfusion innerhalb der nächsten „40 Jahre“ tatsächlich zur Energieerzeugung genutzt werden kann. Trotz gelegentlicher Erfolgsmeldungen ist nicht absehbar, ob dies in ferner Zukunft wirklich möglich ist.

Deutschland hat im Zeitraum von 1990 bis 2020 seinen Anteil von Kernenergie an der Stromerzeugung – politisch gewollt – von maximal etwa 30 Prozent (1997-1999) auf rund 10 Prozent im Jahr 2020 reduziert. Die letzten drei Kernkraftwerke werden im April 2023 ihren Betrieb endgültig einstellen. Diese Entwicklung ist in Deutschland aufgrund der politischen Mehrheiten mit großer Wahrscheinlichkeit unumkehrbar. Weiterhin soll die Nutzung von Braunkohle und Steinkohle zur Stromerzeugung bis zum Jahr 2030 weitgehend eingestellt werden. Somit wird Deutschland zur Stromerzeugung nahezu ausschließlich auf regenerative Energien zurückgreifen müssen. Heizöl spielte in der deutschen Energiepolitik bei der Stromproduktion nie eine Rolle; die Nutzung der „Übergangstechnologie" Erdgas wird – aufgrund der neuen politischen Rahmenbedungen nach aktuellem Stand – bei der Stromerzeugung kaum noch Bedeutung haben.

Die zweite große Wirtschaftsnation der Europäischen Union, Frankreich, hat demgegenüber seit mehr als 50 Jahren auf die Nutzung von Kernenergie gesetzt. Im Jahr 2022 betrug dort der Anteil von Kernenergie an der Stromerzeugung 67,1 Prozent. Dies ist der höchste Kernenergieanteil weltweit. Fossile Brennstoffe sind in Frankreich in der Elektrizitätswirtschaft nicht bedeutsam; neben der Kernenergie werden in Frankreich überwiegend Wasserkraft und Windenergie genutzt. Für die Zukunft plant Frankreich eine weitere Nutzung bzw. den Ausbau der Kernenergienutzung. Nicht zuletzt aufgrund des französischen Einflusses hat die Europäische Union die Stromerzeugung aus Kernenergie im Jahr 2022 als mögliche CO_2-sparende Technologie (zumindest vorübergehend) benannt.

China und Indien sind Länder mit sehr hohen Anteilen von Kohle an der Stromerzeugung (China etwa 70 Prozent, Indien etwa 50 Prozent). Hier sind wegen des immensen Energiebedarfs in Zukunft sogar noch weitere Kohlekraftwerke in Planung. Beide Länder setzen zur Bewältigung der Klimaproblematik auf hohe Steigerungsraten bei der Nutzung von regenerativen Energien, aber auch auf einen weiteren Ausbau der Kernenergie. Ähnliches gilt für die USA, das Land mit den meisten Kernkraftwerken weltweit (93 im Jahr 2022). Kernkraft soll auch weiterhin verstärkt genutzt werden, insbesondere durch rigorose Laufzeitverlängerungen von bis zu 80 Jahren.

Wie sind diese unterschiedlichen Herangehensweisen zu bewerten? Deutschland ist das einzige G7-Land, das bei der Stromerzeugung sowohl auf fossile Energien (Steinkohle, Braunkohle, Erdgas), als auch auf Kernenergie in naher Zukunft (bis 2030) vollständig verzichten will. Dabei war der Kernenergieausstieg bereits nach den Reaktorunfällen in Tschernobyl (1986)

und Fukushima (2011) endgültig beschlossen. Das gleiche galt für das G7-Land Italien, das allerdings bei der Stromerzeugung stark auf Erdgas setzt. Die Wahrnehmung der Reaktorunfälle war demgegenüber in anderen G7-Ländern unterschiedlich. Frankreich, Kanada und die USA haben trotz der erkennbaren Risiken weiterhin auf Kernenergie gesetzt, wobei Frankreich und Kanada bei der Stromerzeugung als nahezu CO_2-frei bezeichnet werden können. China und Indien sind Länder, die eine Bevölkerung von jeweils 1,4 Mrd. Personen aufweisen und sich zudem in starken wirtschaftlichen Entwicklungsphasen befinden. Der Energiebedarf dieser Länder ist dadurch naturgemäß äußerst hoch, was zu einem hohen Anteil am weltweiten Ausstoß von Treibhausgasen geführt hat und weiterführen wird. Eine Reduzierung bis hin zur Klimaneutralität im Jahr 2070 scheint deshalb nur mit einem massiven Ausbau erneuerbarer Energiequellen, bei gleichzeitiger verstärkter Nutzung der Kernenergie, möglich zu sein. Die Risken der Atomkraft werden entsprechend geringer bewertet als die Risiken des Klimawandels. Demgegenüber hat Deutschland in der Vergangenheit eine stärkere Bewertung des Kernenergierisikos vorgenommen und entsprechende energiepolitische Entscheidungen getroffen, die mittlerweile unumkehrbar sind. Allerdings sollte nicht unerwähnt bleiben, dass das Problem der Endlagerung von genutzten Brennelementen auch in Deutschland in absehbarer Zeit nicht gelöst sein wird.[25]

Auch die Nutzungen von Energie für Kraft und Antrieb sowie für Raum- und Prozesswärme werden in Zukunft von Strom bestimmt sein. Zwar kann und wird man in diesen Bereichen verstärkt auf den schadstofffreien Energieträger Wasserstoff bauen, allerdings kann dieser wiederum nur mit Hilfe von Strom erzeugt werden. Der weltweite Strombedarf wird in Zukunft also sehr stark zunehmen. Letztendlich stehen dafür wiederum – nach heutigem Stand – regenerative Energien und Kernenergie zur Verfügung. Da allerdings das Potenzial der Energieerzeugung aus Sonne, Wind, Wasserkraft und Geothermie weit höher als der Verbrauch ist, wird Atomenergie langfristig nur eine Übergangstechnologie sein (Kleinschmitt u.a. 2022).

[25] Nach Angaben des BMUV werden in Deutschland derzeit die bestrahlten Brennelemente an den Standorten der Atomkraftwerke zwischengelagert. Sie verbleiben zunächst dort, wo sie anfallen, bis sie endlagergerecht konditioniert und endgelagert werden. Durch die Zwischenlagerung an den jeweiligen Standort der Atomkraftwerke will man Brennelementtransporte bis zur Endlagerung mit vorlaufender Konditionierung zunächst vermeiden. An zwölf Standorten von Atomkraftwerken wurden dezentrale Brennelemente-Zwischenlager für abgebrannte Brennelemente atomrechtlich genehmigt, errichtet und in Betrieb genommen. Die Lager sind als Trockenlager konzipiert, in die mit bestrahlten Brennelementen beladene Transport- und Lagerbehälter (z.B. in Behältern der Bauart CASTOR) eingelagert werden.

Fallbeispiel 2: Katastrophenschutz und Kompensation für Klimafolgen

Angesichts der Überzeugung, dass der Klimawandel bereits begonnen hat und dass erste Anzeichen der Klimafolgen, wie Starkwetterereignisse, Dürren, Abtauen der Gletscher und Polkappen, bereits sichtbar sind, stellt sich auch die Frage nach einem vorbeugenden Katastrophenschutz.

Prognosen gehen mit großer Wahrscheinlichkeit davon aus, dass der Meeresspiegel im Weltdurchschnitt bis zur Jahrhundertwende um bis zu 0,8 Meter ansteigen kann. Dies gilt auch dann, wenn das 2°-Ziel erreicht wird. "*Wichtig zu wissen ist, dass die Meeresspiegel selbst nach dem Stopp der Emissionen für mehrere Jahrhunderte weiter steigen werden, was an der Trägheit des Klimasystems liegt. Unser heutiges Handeln hat also noch weit in der Zukunft Folgen.*" (Deutsches Klima-Konsortium 2019). Bei Temperaturerhöhungen von 4° und mehr sind nach Aussagen der Wissenschaft auch Anstiege des Meeresspiegels von mehreren Metern möglich.

Davon sind die Kontinente in unterschiedlicher Weise betroffen, da die Anstiege aufgrund unterschiedlicher Bedingungen nicht in jeder Weltregion gleich sind (DKK/KDM 2019). Stark betroffen sind Küstenregionen, Flussmündungen und Flussdeltas asiatischer Länder wie China, Bangladesch, Indien, Indonesien, Thailand, Vietnam, Japan und den Philippinen, die nur wenige Meter über dem Meeresspiegel liegen und eine hohe Bevölkerungsdichte aufweisen. In einzelnen Städten war/ist der Meeresspiegelanstieg sogar erheblich höher, da eine übermäßige Nutzung des Grundwassers zu einer massiven Absenkung der Böden geführt hat (Beispiel: Tianjin in China, Tokio in Japan, Djakarta in Indonesien, u.a.). Gefährdet sind aber auch Regionen der USA, z. B. Florida, Brasiliens sowie afrikanischer Küstenländer, wo es kaum effizienten Küstenschutz gibt. Für Norddeutschland und die Niederlande ergeben sich nach aktuellem Wissensstand demgegenüber keine gravierenden Bedrohungen durch Überflutungen. Grund ist der bereits existierende Küstenschutz, der aufgrund der zukünftigen Risiken weiter ausgebaut werden wird. Planungen bis zum Jahr 2050 liegen weitgehend vor (Schirmer 2018).

Die notwendige Finanzierung des zukünftigen Küstenschutzes führt wiederum zur Frage der Verantwortung für den Klimawandel. Die Länder Europas und Nordamerikas sowie Japan und China werden aufgrund ihrer Wirtschaftskraft ihre landesspezifischen Maßnahmen selber finanzieren müssen und mit großer Wahrscheinlichkeit können. Ein erster Diskussionspunkt könnte bei der Verantwortung für den Meeresspiegelanstieg in Brasilien und Indien entstehen. Beide Länder sind – auf verschiedene Weise – am Klimawandel beteiligt; entweder durch den zunehmenden Einsatz fossiler Brennstoffe, andererseits durch Abholzung er Regenwälder.

Müssen diese Länder ihren Küstenschutz und die Folgen des Meeresspiegelanstiegs selber finanzieren oder müssen sich die Industrieländer aufgrund einer historischen bzw. globalen Verantwortung daran beteiligen?

Bei den bedrohten Ländern Afrikas scheint das Anrecht auf Unterstützung durch die traditionellen Industrieländer, einschließlich China, eher berechtigt zu sein. Afrika hat bisher einen relativ geringen Anteil an den Treibhausgasemissionen (3,9 Prozent bei einem Bevölkerungsanteil von 17,1 Prozent; siehe Tab. 6) aufzuweisen und ist somit für die Klimafolgen kaum zur Verantwortung zu ziehen. Insofern sind finanzielle Forderungen der Entwicklungsländer verständlich.

Der finanzielle Ausgleich für Klimaschutzmaßnahmen und Klimaschäden bezieht sich aber nicht nur auf den Küstenschutz. Bereits auf der UN-Klimakonferenz in Kopenhagen (2009) haben die teilnehmenden Länder sich bereit erklärt (allerdings ohne vertragliche Vereinbarung) Ausgleichszahlungen bei klimabedingten Schäden für arme und durch den Klimawandel besonders bedrohte Länder bereitzustellen. Im Pariser Klimaabkommen wurde noch einmal bestätigt, dass im Zeitraum 2020 bis 2025 jährlich 100 Mrd. US-Dollar aus öffentlichen und privaten Quellen zur Verfügung stehen sollen. In der UN-Klimakonferenz von Scharm el-Scheich (Ägypten 2022) wurde zudem vereinbart, dazu einen Fond aufzubauen und in der Klimakonferenz von Dubai (VAR 2023) zu operationalisieren. Insbesondere soll geklärt werden, welche Länder in den Fond einzahlen. Dabei ist noch offen, welchen Netto-Beitrag beispielsweise auch Schwellenländer wie China, Brasilien und Indien leisten werden. Bezüglich der Ausgestaltung des Fonds gibt es derzeit noch sehr kontroverse Auffassungen zwischen den europäischen Ländern, den USA, den Schwellenländern und den Entwicklungsländern. Deutschland hat allerdings die seit 2009 zugesagten Beiträge stets geleistet.

Fallbeispiel 3: CDS (Carbon Dioxid Storage)

Die Abscheidung von Kohlendioxid aus Verbrennungsprozessen und die anschließende Speicherung im Untergrund (*carbon capture and storage* – CCS) bzw. die Abscheidung mit nachfolgender Nutzung des CO_2 *(carbon capture and utilization - CCU)* wird auch vom IPCC (2021) als Möglichkeit angesehen, um negative Klimawirkungen der Nutzung fossiler Energien, z.B. bei der Stromerzeugung, der Zementherstellung, der Eisen- und Stahlproduktion, in der chemischen Industrie u.a., zu reduzieren.

Das Verfahren des CCS setzt sich aus drei einzelnen Prozessstufen zusammen:

- Abscheidung des Kohlendioxids,
- Transport des Kohlendioxids zu einer Lagerstätte,
- dauerhafte und sichere Speicherung des Kohlendioxids.

Es stehen mehrere Varianten zur **Abscheidung** des Kohlendioxids zur Verfügung, die sich hinsichtlich des Zeitpunkts der Kohlendioxidabscheidung unterscheiden:

- Abscheidung des CO_2 aus dem Rauchgas nach der Verbrennung (*post-combustion*)
- Abscheidung des Kohlenstoffs aus dem Brennstoff vor der Verbrennung (*pre-combustion*)
- Verbrennung mit reinem Sauerstoff (Oxyfuel-Verfahren)

Das Oxyfuel-Verfahren ist bisher noch nicht kommerziell genutzt worden; Pre-Combustion-Verfahren sind für die Reinigung von Synthesegas bereits Stand der Technik. Beide Verfahren werden nachfolgend nicht weiter betrachtet. Die Post-Combustion-Abscheidung erfolgt bei Kohlenverbrennungsprozessen nach der Staubfilterung, der Rauchgasentschwefelung und der Entfernung der Stickoxide aus dem Rauchgas (Entstickung).[26] Sie ist insofern von besonderer Bedeutung, da es sich um eine sogenannte End-of-pipe-Technologie handelt, die das Nachrüsten bestehender Kraftwerke ermöglicht (Leßmann, Steinkraus 2016). Am Ende des Verbrennungsprozesses wird das von Schadstoffen gereinigte Rauchgas an die Umgebung abgegeben.

Das abgeschiedene Kohlendioxid wird für den **Transport** zur Endlagerstätte zunächst verdichtet. Der Transport kann dann in Kesselwagen (Schiene und Straße), in Pipelines und/oder in Tankschiffen erfolgen. Dabei ist sicherzustellen, dass das abgeschiedene Medium nicht beim Transport vom Kraftwerk zur Speicherstätte freigesetzt wird. Die entsprechenden Technologien sind aber schon lange bekannt und in der Praxis erprobt. (Bundesregierung 2022, Kap. 2.2)

Die sichere dauerhafte **Speicherung** des abgeschiedenen Kohlendioxids ist die größte Herausforderung im CCS-Prozess. Sie erfolgt im Porenraum von Gesteinsschichten[27] in etwa 1000 bis 4000 m Tiefe, die von undurchlässigen Deckschichten überlagert werden. Das können beispielsweise erschöpfte Kohlenwasserstofflagerstätten (in Deutschland vor allem Erdgas-

[26] Rauchgasentschwefelungsanlagen sind in Kraftwerken seit fast 40 Jahren vorgeschrieben, u. a. in der 13. Großfeuerungsanlagenverordnung aus dem Jahre 1983. Sie haben dazu beigetragen, dass der Ausstoß von Schwefeldioxid, Stickoxiden und Staub in Kraftwerken maßgeblich eingeschränkt wurde.

[27] Der Porenraum ist das in einem porösen Speichergestein, z. B. Sandstein, zur Verfügung stehende Speichervolumen.

und Erdölfelder) sein oder sogenannte salinare Aquifere (salzführende Gesteinsschichten)[28]. Ab einer Tiefe von mehr als 800 Metern wird das Kohlendioxid zu einer sogenannten überkritischen Flüssigkeit. Das Volumen des CO_2 wird dabei erheblich reduziert (von 1000 auf 3,8 Kubikmeter), so dass große Mengen geologisch gespeichert werden können (BGR 2022). Die Speicherung von CO_2 kann aber auch unter dem Meeresboden erfolgen (Bundesregierung 2022, Kap. 2.3).

Es gibt also – weltweit - eine Vielzahl möglicher Speicherstätten für abgeschiedenes Kohlendioxid. Allerdings müssen die mit einem Austritt des Kohlendioxids verbundenen Gefahren geprüft werden; darüber hinaus ist ein kontinuierliches Monitoring der Speicherstätten erforderlich.

Wie wird die Nutzung des CCS-Verfahrens national und international bewertet? Im Jahr 2009 trat die Richtlinie über die geologische Speicherung von Kohlendioxid (2009/31 EG) der Europäischen Kommission in Kraft. Sie bezeichnet die Abscheidung und geologische Speicherung von Kohlendioxid als „*Brückentechnologie, die zur Abschwächung des Klimawandels beiträgt*“ (Art. 4). Allerdings wurde gleichzeitig das Ziel der Energieeinsparung und des Ausbaus erneuerbarer Energien betont: „*Diese Technologie sollte nicht als Anreiz dienen, den Anteil von Kraftwerken, die mit konventionellen Brennstoffen befeuert werden, zu steigern. Die Entwicklung dieser Technologie sollte sowohl bei der Forschung als auch bei der Finanzierung nicht dazu führen, dass die Bemühungen zur Förderung von Energiesparmaßnahmen, von erneuerbaren Energien und von anderen sicheren und nachhaltigen kohlenstoffarmen Technologien verringert werden.“* Deutschland hat diese Richtlinie mit dem Gesetz zur Demonstration der dauerhaften Speicherung von Kohlendioxid (Kohlendioxid-Speicherungsgesetz, KSpG), im Jahr 2012 umgesetzt.

Allerdings gab es gegen die Nutzung von CCS in Deutschland zu Beginn erhebliche Widerstände von Umweltverbänden, insbesondere bei einem Einsatz von CCS in der Stromerzeugung. Auch das Umweltbundesamt war der Ansicht, dass Deutschland ohne den Einsatz von CCS treibhausgasneutral werden könnte, wenn im Bereich Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF) positive Emissionsbilanzen durch CO_2 senken geschafften würden. In Deutschland sind deshalb in den letzten 10 Jahren nur einzelne

[28] Erschöpfte Erdgaslagerstätten sind insofern eine geeignete Speichermöglichkeit für CO_2, da die Deckschichten bereits über Millionen von Jahren Gase zurückhalten konnten. Die Speicherkapazität solcher Erdgasfelder wird in Deutschland auf etwa 2,75 Milliarden Tonnen geschätzt. Das Speicherpotenzial von erschöpften deutschen Erdölfeldern ist allerdings relativ gering (etwa 130 Mill. Tonnen CO_2). Das größte Speicherpotenzial befindet sich in Deutschland in tiefen salinaren Aquiferen. Insgesamt geht das Bundesinstitut für Geowissenschaften von Kapazitäten zwischen 6,3 und 12,8 Mrd. Tonnen CO_2 aus. (BGR 2022).

CCS-Pilotprojekte durchgeführt worden. Einige Bundesländer hatten eine sogenannte Länderklausel des KSpG genutzt und die Kohlendioxid-Speicherung in ihren Landesflächen vollständig ausgeschlossen.

Mittlerweile haben sich einige Rahmenbedingungen in Deutschland aber maßgeblich geändert. Zum einen ist der Ausstieg aus der Verstromung von Stein- und Braunkohle bis zum Jahr 2038 gesetzlich festgeschrieben; darüber hinaus ist eine Verkürzung der Nutzungszeit bis zum Jahr 2030 sehr wahrscheinlich. Insofern würde CCS ausschließlich im industriellen Bereich eine sinnvolle Option sein, z.B. in der Zementindustrie. Es könnte somit dazu beitragen, die geplante Reduzierung von Treibhausgasen in der Industrie von 186 auf 118 Mill Tonnen bis zum Jahr 2030 zu ermöglichen (Tabelle 7). Zum anderen ist mittlerweile national und international deutlich geworden, dass das Ziel der Treibhausgasneutralität nur durch eine Kombination verschiedener Maßnahmen möglich ist, dazu gehört auch CCS (IPCC 2021).

Weltweite CCS-Projekte, in denen nachweislich die CO2-Abscheidung, der Transport und die Speicherung technisch durchführbar sind, werden vom Global CCS Institute (GCCSI) in einer Datenbank (CO2RE – Global CCS Facilities Data-base) zusammengetragen (Global CCS Institute, 2022). Aktuell führt die CO2RE-Datenbank 30 operative kommerzielle Projekte (13 in den USA, 5 in Kanada, 3 in China, 2 in Norwegen sowie je ein Projekt in Australien, Brasilien, Island, Katar, Ungarn, Saudi-Arabien und den Vereinigten Arabischen Emiraten). Bei 28 laufenden kommerziellen Projekten fällt das CO_2 im Rahmen eines industriellen Prozesses an. Nach der Datenbank des GCCSI sind derzeit (Stand 2022) weitere 11 kommerzielle CCS-Projekte im Bau und 153 Projekte in der Planung. Dadurch würde die weltweite CO_2-Abscheidekapazität insgesamt von derzeit 42,6 auf 241,7 Mill. Tonnen pro Jahr steigen (Global CCS Institute, 2022). Informationen zur tatsächlich erreichten CO_2-Speicherrate liegen nicht vor.

Mögliche Arbeitsthemen für Seminare:

1) Historische, ethische und rechtliche Verantwortung für den Klimawandel und seine Folgen.
2) Einordnung der Gefahren von Kriegen, Atomwaffen, Kernenergie und Klimawandel.
3) Bedeutung von Effizienz- Konsistenz- und Suffizienz-Strategien.
4) Sinnvolle Konzepte für THG-Einsparungen im Bereich der Mobilität (Straße, Schiene, Luft, Wasser).
5) Sinnvolle Konzepte für THG-Einsparungen im Gebäudebereich (Heizen, Kochen, u.a.).
6) Wandel in der Automobilindustrie (einschl. Car-Sharing-Konzepte).
7) Vorsorgende Klimapolitik (u.a. Katastrophenschutz)
8) Klimawandel und soziale Gerechtigkeit

Alphabetisches Quellenverzeichnis

Agora Verkehrswende (2017): Strategien für die nachhaltige Rohstoffversorgung der Elektromobilität Synthesepapier zum Rohstoffbedarf für Batterien und Brennstoffzellen

Arrhenius, S. (1896): On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground. In: Philosophical Magazine and Journal of Science Series 5, Volume 41, April 1896, pages 237-276.

Belo J.C. (2020): Die Wechselwirkungen von Vulkanismus und Klima. In O. Jorzik, J. Kandarr, P. Klinghammer, D. Spreen (Hrsg.): ESKP-Themenspezial Vulkanismus und Gesellschaft. Zwischen Risiko, Vorsorge und Faszination, Helmholtz-Zentrum Potsdam und Deutsches Geo-Forschungs-Zentrum GF.

BMWE (2021): Zahlen und Fakten: Energiedaten: Nationale und internationale Entwicklung, Stand: 27.9.2021, http://www.bmwi.de/Navigation/DE/Themen/energiedaten.html <1.12.2021>

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (2022): Nutzung tieferer Untergrund / CO_2-Speicherung. https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Nutzung_tieferer_Untergrund_CO2Speicherung/nutzung_tieferer_untergrund_co2speicherung_node.html <3.1.2023>

Bundesregierung (2022): Evaluierungsbericht der Bundesregierung zum Kohlendioxid-Speicherungsgesetz (KSpG). https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energiedaten/evaluierungsbericht-bundesregierung-kspg.html <3.1.2023>.

Bundesinstitut für Bevölkerungsforschung (2022): Wachstumsrate der Weltbevölkerung 1950 -1990. https://www.bib.bund.de/DE/Fakten/Fakt/pdf/W48-Bevoelkerungswachstum-Kontinente-ab-1950.pdf?__blob=publicationFile&v=2 <1.12.2022>

Bundeszentrale für politische Bildung (2019), Kleine Geschichte der Klimadebatte (Autor: Uekötter, F.) https://www.bpb.de/shop/zeitschriften/apuz/300412/kleine-geschichte-der-klimadebatte <1.12.2022>

Bundeszentrale für politische Bildung (2022): Chinas Klimapolitik (Autorin: Sternfeld, E.), https://www.bpb.de/themen/asien/china/512519/chinas-klimapolitik <1.12.2022>

CO2-GeoNet (20..): CO_2GeoNet Association - European Network of Excellence on Geological Storage of CO_2

Crippa, M. / Guizzardi, D. / Muntean, M. / Schaaf, E. / Lo Vullo, E. / Solazzo, E. / Monforti-Ferrario, F. / Olivier, J. / Vignati, E. (2021) : EDGAR v6.0 Greenhouse Gas Emissions. European Commission, Joint Research Centre (JRC) [Dataset] PID: http://data.europa.eu/89h/97a67d67-c62e-4826-b873-9d972c4f670b <1.7.2022>

Crippa, M. / Guizzardi, D. / Solazzo, E. / Muntean, M. / Schaaf, E. / Monforti-Ferrario / F. / Banja, M. / Olivier / J. / Grassi, G. / Rossi, S. / Vignati, E. (2021): GHG emissions of all world countries, EUR 30831 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2021, ISBN 978-92-76-41547-3, doi:10.2760/074804, JRC126363. <1.7.2022>

Deutsche Energieagentur GmbH (dena) (2021): Privates Ladeinfrastrukturpotenzial in Deutschland - Herausforderungen bei der Entwicklung der privaten Ladeinfrastruktur zur Beschleunigung des Markthochlaufs der Elektromobilität in Deutschland.

Deutsches Klima Konsortium (DKK) und Konsortium Deutsche Meeresforschung (KDM) (2019): Zukunft der Meeresspiegel - Fakten und Hintergründe aus der Forschung, Berlin Dezember 2019.

Deutscher Wetterdienst (2022): Wetter- und Klimalexikon https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/lexikon_node.html <1.12.2022>

Deutscher Wetterdienst (2021): Was wir heute über das Extremwetter in Deutschland wissen. Stand der Wissenschaft zu extremen Wetterphänomenen im Klimawandel in Deutschland. Herausgeber: Deutscher Wetterdienst und Extremwetterkongress Hamburg. https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/aktuelle_meldungen/210922/Faktenpapier-Extremwetterkongress_download.pdf?__blob=publicationFile&v=1 <12.1.2023>

Deutscher Wetterdienst (2022): Zeitreihen und Trends, https://www.dwd.de/DE/leistungen/zeitreihen/zeitreihen.html <1.12.2022>

Evans, S. (2021): Analysis - Which countries are historically responsible for climate change? https://www.carbonbrief.org/analysis-which-countries-are-historically-responsible-for-climate-change/ <6.12.2022>.

Fraunhofer Institut (ISI) (2018): Energiespeicher-Monitoring 2018 Leitmarkt- und Leitanbieterstudie: Lithium-Ionen-Batterien für die Elektromobilität

Gerlach, T. (2011): Volcanic versus anthropogenic carbon dioxide. Eos, Transactions American Geophysical Union, 92 (24). 201-202.

Global CCS Institute (2022): CO2Re Facilities Database. https://co2re.co/FacilityData <4. 1. 2023>

GRS GmbH (2022): Kernenergie weltweit. https://www.grs.de/de/aktuelles/kernenergie-weltweit-202

Gutjahr, M. / Ridgwell, A. / Sexton, P.F. / Anagnostou, E. / Pearson, HP.N. / . Pälike, R. / Norris, E. / Foster, G.L. / Foster, T (2017): Very large release of mostly volcanic carbon during the Paleocene-Eocene Thermal Maximum. Nature, http://dx.doi.org/10.1038/nature23646 <4. 1. 2023>

Holloway, S. / Pearce, J.M. / Ohsumi, T. / Hards, V.L., (2005): A Review of Natural CO2 Occurrences and their Relevance to CO2 Storage, British Geological Survey.

IPCC (2019): Der Ozean und die Kryosphäre in einem sich wandelnden Klima - Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. IPCC-Sonderbericht.

IPCC (2019): Klimawandel und Landsysteme - Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. IPCC-Sonderbericht über Klimawandel, Desertifikation, Landdegradierung, nachhaltiges Landmanagement, Ernährungssicherheit und Treibhausgasflüsse in terrestrischen Ökosystemen.

IPCC (2021): Climate Change 2021, The Physical Science Basis - Summary for Policy Makers. Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

Kleinschmitt,Ch./García Fragoso, J./Franke, K./Teza, D./Seidel, L./Ebner, A./Baier, M. (2022): Weltweite Potenziale erneuerbarer Energien. HYPAT Working Paper 03/2022

Leßmann, Ch. / Steinkraus, A. (2016): Kurs zum Thema: Carbon Capture and Storage - was kostet die Emissionsvermeidung? ifo Schnelldienst 5/2016 – 69. Jahrgang – 10. März 2016.

Met Office (2022): 2021 continues warm global temperature series (Autor: Madge, G.), https://www.metoffice.gov.uk/about-us/press-office/news/weather-and-climate/2022/2021-hadcrut5-wmo-temperature-statement <1.12.2022>

Müller-Westermeier (o.J.): Verfügbarkeit und Qualität flächenbezogener Klimadaten https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimakartendeutschland/detailbeschreibung.html;jsessionid=E3CE871964BFD76652046138139F03ED.live11042?nn=16102#Start <8.11.2022>

Peterson, T. C. / Connolley, W. M. / Fleck, J. (2008): The Myth of the 1970s global cooling scientific consensus. Bulletin of the American Meteorological Society Vol. 89, No. 9, pp. 1325-1337.

Schirmer, M. (2018): Küstenschutz bis und nach 2100 in Deutschland und den Niederlanden. In Lozán, J. L., S.-W. Breckle, H. Graßl, D. Kasang & R. Weisse (Hrsg.): Warnsignal Klima - Extremereignisse. Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg

Statista (2022): Industrien und Märkte – Ladeinfrastruktur. https://de.statista.com/statistik/studie/id/101151/dokument/ladeinfrastruktur/ <28.12.2022>

Umweltbundesamt (2017): Klimaneutraler Gebäudebestand 2050, Energieeffizienzpotentiale und die Auswirkungen des Klimawandels auf den Gebäudebestand. Climate Change 26/2017.

Umweltbundesamt (2020): 13 Thesen für einen treibhausgasneutralen Gebäudebestand - Drängende Herausforderungen der Wärmewende.

Umweltbundesamt (2020): Folgen des globalen Klimawandels für Deutschland – Abschlussbericht: Analysen und Politikempfehlungen <1.12.2022>.

Umweltbundesamt (2020): Klimaschutz durch Tempolimit. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-06-15_texte_38-2020_wirkung-tempolimit_bf.pdf <1.12.2022>.

Umweltbundesamt (2021) : Atmosphärische Treibhausgas-Konzentrationen. https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima (zuletzt bearbeitet am 8.9.2021) <1.12.2022>.

United Nations (2022): World Population Prospects 2022 File GEN/01/REV1: Demographic indicators by region, subregion and country, annually for 1950-2100, Estimates, 1950 – 2021

World Meteorological Organization (2023): GAW Global Stations. Prospects 2022. https://community.wmo.int/activity-areas/gaw/research-infrastructure/gaw-stations/gaw-global-stations <7.1.2023>

Kommentiertes Quellenverzeichnis nach Themen

Historie der CO_2-Forschung und Länderstudien

Arrhenius, S. (1896): On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground. In: Philosophical Magazine and Journal of Science Series 5, Volume 41, April 1896, pages 237-276.

Der Artikel von Arrhenius aus dem Jahr 1896 ist insofern ein historisches Dokument, da hier zum ersten Mal der Zusammenhang zwischen Temperatur und CO2-Konzentration wissenschaftlich untersucht und publiziert wird.

Bundeszentrale für politische Bildung (2019), Kleine Geschichte der Klimadebatte (Autor: Uekötter, F.) https://www.bpb.de/shop/zeitschriften/apuz/300412/kleine-geschichte-der-klimadebatte <1.12.2022>

Der Beitrag gibt einen guten Eindruck davon, wie sich nach dem 2. Weltkrieg die internationale Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Klimaforschung entwickelt hat.

Peterson, T. C. / Connolley, W. M. / Fleck, J. (2008): The Myth of the 1970s global cooling scientific consensus. Bulletin of the American Meteorological Society Vol. 89, No. 9, pp. 1325-1337.

Dieser Artikel zeigt, dass in den 1970er Jahren zwar häufig in den Medien von der Möglichkeit einer nächsten Eiszeit geschrieben wurde, die wissenschaftlichen Studien aber zu einem sehr überwiegenden Teil bereits eher von einer Klimaerwärmung ausgegangen sind.

Bundeszentrale für politische Bildung (2022): Chinas Klimapolitik (Autorin: Sternfeld, E.), https://www.bpb.de/themen/asien/china/512519/chinas-klimapolitik <1.12.2022>

Der Artikel beschreibt anschaulich die Ursachen für die Entwicklung Chinas zum größten Verursacher von CO_2-Emissionen. Zudem werden die geplanten und bereits realisierten Maßnahmen gegen einen weiteren Anstieg der Emissionen dargestellt.

CO_2 und Vulkanismus

Belo J.C. (2020): Die Wechselwirkungen von Vulkanismus und Klima. In O. Jorzik, J. Kandarr, P. Klinghammer, D. Spreen (Hrsg.): ESKP-Themenspezial Vulkanismus und Gesellschaft. Zwischen Risiko, Vorsorge und Faszination, Helmholtz-Zentrum Potsdam und Deutsches Geo-Forschungs-Zentrum GF.

Gerlach, T. (2011): Volcanic versus anthropogenic carbon dioxide. Eos, Transactions American Geophysical Union, 92 (24). 201-202.

Gutjahr, M. / Ridgwell, A. / Sexton, P.F. / Anagnostou, E. / Pearson, HP.N. / . Pälike, R. / Norris, E. / Foster, G.L. / Foster, T (2017): Very large release of mostly volcanic carbon during the Paleocene-Eocene Thermal Maximum. Nature, http://dx.doi.org/10.1038/nature23646 <4. 1. 2023>

Holloway, S. / Pearce, J.M. / Ohsumi, T. / Hards, V.L., (2005): A Review of Natural CO2 Occurrences and their Relevance to CO2 Storage, British Geological Survey.

Die Studien zum Zusammenhang zwischen Vulkanismus und weltweiten Temperaturen sind nicht so umfassend die Beiträge zu anderen Klimathemen. Eine gute erste und kurze Übersicht gibt der Beitrag von J. C. Belo vom GEOMAR - Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel.

Daten zu CO_2-Konzentration, Temperaturentwicklung, Bevölkerungsentwicklung

BMWE (2021): Zahlen und Fakten: Energiedaten: Nationale und internationale Entwicklung, Stand: 27.9.2021, http://www.bmwi.de/Navigation/DE/Themen/energiedaten.html <1.12.2021>

Das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimawandel (BMWK, früher BMWI oder BMWE) veröffentlicht jährlich einen Datenband zur nationalen und internationalen Energiewirtschaft sowie zu Treibhausgasemissionen. Die Daten sind als EXCEL-Tabellen frei verfügbar und können deshalb für gezielte Untersuchungen problemlos modifiziert und genutzt werden.

United Nations (2022): World Population Prospects 2022 File GEN/01/REV1: Demographic indicators by region, subregion and country, annually for 1950-2100, Estimates, 1950 – 2021

Bundesinstitut für Bevölkerungsforschung (2022): Wachstumsrate der Weltbevölkerung 1950 -1990. https://www.bib.bund.de/DE/Fakten/Fakt/pdf/W48-Bevoelkerungswachstum-Kontinente-ab-1950.pdf?__blob=publicationFile&v=2 <1.12.2022>

Aktuelle und historische Daten bzw. Projektionen über Bevölkerungsentwicklungen (nationale und international) sind umfassend über die Vereinten Nationen und das deutsche Bundesinstitut für Bevölkerungsforschung abrufbar.

Crippa, M. / Guizzardi, D. / Muntean, M. / Schaaf, E. / Lo Vullo, E. / Solazzo, E. / Monforti-Ferrario, F. / Olivier, J. / Vignati, E. (2021) : EDGAR v6.0 Greenhouse Gas Emissions. European Commission, Joint Research Centre (JRC) [Dataset] PID: http://data.europa.eu/89h/97a67d67-c62e-4826-b873-9d972c4f670b <1.7.2022>

Die Europäische Union bietet mit EDGAR eine umfassende, frei zugängliche Datenbank über Emissionen von Treibhausgasen in allen EU-Ländern.

IPCC (2019): Der Ozean und die Kryosphäre in einem sich wandelnden Klima - Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. IPCC-Sonderbericht.

IPCC (2019): Klimawandel und Landsysteme - Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. IPCC-Sonderbericht über Klimawandel, Desertifikation, Landdegradierung, nachhaltiges Landmanagement, Ernährungssicherheit und Treibhausgasflüsse in terrestrischen Ökosystemen.

IPCC (2021): Climate Change 2021, The Physical Science Basis - Summary for Policy Makers. Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

Der Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) ist eine Institution der Vereinten Nationen. In seinem Auftrag tragen Experten weltweit den aktuellen Kenntnisstand zum Klimawandel zusammen und bewerten ihn aus wissenschaftlicher Sicht. Der IPCC veröffentlicht die derzeit umfassendsten Berichte und Daten über alle Aspekte des Klimawandels. Alle vergangenen und aktuellen Berichte (in englischer und deutscher Sprache) sind frei zugänglich. Zu beachten ist, dass das Informationsmaterial so groß ist, dass eine Sichtung sehr viel Aufwand erfordert.

Umweltbundesamt (2021): Atmosphärische Treibhausgas-Konzentrationen. https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima (zuletzt bearbeitet am 8.9.2021) <1.12.2022>.

Das Umweltbundesamt hat eine Vielzahl von weiteren Studien und Daten zum Klimawandel veröffentlicht.

Deutscher Wetterdienst (2022): Wetter- und Klimalexikon https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/lexikon_node.html <1.12.2022>

Deutscher Wetterdienst (o.J.): Verfügbarkeit und Qualität flächenbezogener Klimadaten (Autor: Müller-Westermeier, G). https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimakartendeutschland/detailbeschreibung.html;jsessionid=E3CE871964BFD76652046138139F03ED.live11042?nn=16102#Start <8.11.2022>

World Meteorological Organization (2023): GAW Global Stations. Prospects 2022. https://community.wmo.int/activity-areas/gaw/research-infrastructure/gaw-stations/gaw-global-stations <7.1.2023>

Auf den Websites des Deutschen Wetterdienstes werden aktuelle und historische Klimadaten für Deutschland und weltweit bereitgestellt. Zudem findet man Ausarbeitungen über methodische Fragen der Wetterbeobachtung. Der Deutsche Wetterdienst kooperiert kontinuierlich mit Wetterdiensten anderer Länder sowie der Weltwetterorganisation.

Klimafolgen

Deutscher Wetterdienst (2021): Was wir heute über das Extremwetter in Deutschland wissen - Stand der Wissenschaft zu extremen Wetterphänomenen im Klimawandel in Deutschland. Herausgegeben von Deutscher Wetterdienst und Extremwetterkongress Hamburg.

Dieser Beitrag gibt auf 21 Textseiten Kerninformationen zu Extremwetterereignissen in Deutschland und betrachtet dabei folgende Aspekte:

- Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten von Extremwetterereignissen,
- Zunahme von Hitzewellen als eine Folge der globalen Erwärmung,
- Anstiege der Häufigkeit von Trockenphasen,
- Veränderungen der Windgeschwindigkeit an der Nordsee,
- Bewertungen von Schadenrisiken durch Starkregenereignisse.

Deutsches Klima Konsortium (DKK) und Konsortium Deutsche Meeresforschung (KDM) (2019): Zukunft der Meeresspiegel - Fakten und Hintergründe aus der Forschung, Berlin Dezember 2019.

Die beiden Wissenschaftsverbände Deutsches Klima-Konsortium (DKK) und Konsortium Deutsche Meeresforschung (KDM) geben in diesem Beitrag (32 Seiten) einen verständlichen Überblick über den wissenschaftlichen Kenntnisstand zum Anstieg der Meeresspiegel. Der Texte bietet eine Grundlage, Zukunftsszenarien und Risiken für die deutschen Küstengebiete einzuschätzen.

Schirmer, M. (2018): Küstenschutz bis und nach 2100 in Deutschland und den Niederlanden. In Lozán, J. L., S.-W. Breckle, H. Graßl, D. Kasang & R. Weisse (Hrsg.): Warnsignal Klima - Extremereignisse. Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg

Es werden Maßnahmen in den Niederlanden und Deutschland beschreiben, die mögliche Folgen des Klimawandels an den Nordseeküsten bis zur nächsten Jahrhundertwende verhindern sollen.

Umweltbundesamt (2008): Kippunkte im Klimasystem – Welche Gefahren drohen?

Dieser Beitrag des Umweltbundesamtes ist zwar fast 15 Jahre alt, gibt aber einen guten ersten Überblick über 13 mögliche Kipppunkte (Abschmelzen der Eisschilde in der Arktis und auf Grönland, Auftauen des Permafrostbodens u.a.) sowie eine erste Risikoeinschätzung.

Stromerzeugung, Mobilität und Gebäude, Carbon Capture Storage

Expertenrat für Klimafragen (2022): Zweijahresgutachten 2022 - Gutachten zu bisherigen Entwicklungen der Treibhausgasemissionen, Trends der Jahresemissionsmengen und Wirksamkeit von Maßnahmen (gemäß § 12 Abs. 4 Bundes-Klimaschutzgesetz)

In diesem aktuellen Gutachten (262 Seiten) wird umfassend die Entwicklung der Treibhausgasemissionen in allen relevanten Bereichen dargestellt. Darüber hinaus werden die bisher eingeleiteten Maßnahmen zur Einhaltung der deutschen Klimaziele kritisch bewertet.

Agora Verkehrswende (2017): Strategien für die nachhaltige Rohstoffversorgung der Elektromobilität Synthesepapier zum Rohstoffbedarf für Batterien und Brennstoffzellen

In dem Beitrag wird versucht abzuschätzen, ob der Übergang von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren zu Fahrzeugen mit vollständigem oder teilweisem Elektroantrieb möglich ist. Der Bedarf an Rohstoffen für Batterien und Brennstoffzellen wird den weltweit vorhandenen Ressourcen gegenübergestellt. Der Text gibt einen guten ersten Eindruck über den aktuellen Sachstand, betrachtet allerdings einige Aspekte wie die Arbeitsbedingungen in Entwicklungsländern nur am Rande.

Deutsche Energieagentur GmbH (dena) (2021): Privates Ladeinfrastrukturpotenzial in Deutschland - Herausforderungen bei der Entwicklung der privaten Ladeinfrastruktur zur Beschleunigung des Markthochlaufs der Elektromobilität in Deutschland.

Fraunhofer Institut (ISI) (2018): Energiespeicher-Monitoring 2018
Leitmarkt- und Leitanbieterstudie: Lithium-Ionen-Batterien für die Elektromobilität

Statista (2022): Industrien und Märkte – Ladeinfrastruktur.
https://de.statista.com/statistik/studie/id/101151/dokument/ladeinfrastruktur/ <28.12.2022>

Alle drei Artikel informieren über die Möglichkeiten und Anforderungen für die Transformation zu Elektromobilität in Deutschland. Schwerpunkt ist der Ausbau der Ladeinfrastruktur für Elektroautos.

Global CCS Institute (2022): *CO2Re Facilities Database*. https://co2re.co/FacilityData <4. 1. 2023>

Bundesregierung (2022): Evaluierungsbericht der Bundesregierung zum Kohlendioxid-Speicherungsgesetz (KSpG).
https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energiedaten/evaluierungsbericht-bundesregierung-kspg.html <3.1.2023>.

Das Global CCS Institut bietet in einer Datenbank Informationen über bestehende und zukünftige CCS-Projekte weltweit an.
Der Erfahrungsbericht der Bundesregierung (215 Seiten) ist eine aktuelle umfassende Zusammenstellung des Sachstandes zum Thema CCS. Es werden technologische und rechtliche Aspekte sowohl national als auch auf europäischer Ebene betrachtet.

Umweltbundesamt (2017): Klimaneutraler Gebäudebestand 2050, Energieeffizienzpotentiale und die Auswirkungen des Klimawandels auf den Gebäudebestand. Climate Change 26/2017.

Umweltbundesamt (2020): 13 Thesen für einen treibhausgasneutralen Gebäudebestand - Drängende Herausforderungen der Wärmewende.

Beide Artikel geben eine gute Übersicht über die Problematik der Treibhausgasemissionen im Bereich der Gebäude (Raumwärme u.a.)