



**Heiko Barske**

# **Die Energiewende zwischen Wunsch und Wirklichkeit**

Die Natur setzt unserer  
Freiheit Grenzen

# Inhaltsverzeichnis

Über die Entstehung dieses Buches . . . . .	9
Vorwort	
<b>I Fukushima, Klimaerwärmung, Ziel: klimaneutrale Energieversorgung – Einleitung . . . . .</b>	<b>13</b>
<b>II Der Mensch hat einen erheblichen Anteil an der aktuellen Klimaerwärmung . . . . .</b>	<b>19</b>
II.1 Abriss der Klimageschichte . . . . .	19
II.2 Natürliche Ursachen der Klimaschwankungen . . . . .	23
II.3 Einfluss des Menschen . . . . .	34
II.4 Ausblick in die Zukunft . . . . .	43
<b>III Ursachen für den »westlichen« Lebensstil – Freiheit ohne Verantwortung . . . . .</b>	<b>51</b>
III.1 Die Kolonialisierung: ein Verstoß gegen christliche Werte . . . . .	51
III.2 Aufklärung, Französische Revolution und Säkularisierung . . . . .	52
III.3 Ersatz menschlicher Arbeit durch Maschinen ermöglicht Wachstum	53
III.4 Die Industrialisierung erfordert neue Finanzierungsmöglichkeiten	54
III.5 Kreditfinanzierung erfordert Wachstum . . . . .	55
III.6 Mentalitätswandel in der Wachstumswirtschaft . . . . .	57
III.7 Entstehung der Finanzindustrie; Geld wird zum Selbstzweck . . . . .	62
III.8 Abhängigkeit der Entwicklungsländer . . . . .	64
III.9 Abhängigkeit der Industrieländer . . . . .	65
III.10 Zunehmende Schere zwischen Arm und Reich . . . . .	66
III.11 Die allgemeinen Menschenrechte — Neigung zum Egoismus . . . . .	67
III.12 Der westliche Lebensstil — Konsum ohne Rücksicht . . . . .	69
<b>IV Begrenzung der Freiheit des Einen durch die Freiheit der Anderen . . . . .</b>	<b>73</b>

<b>V</b>	<b>Energiesituation der BRD in 2018</b>	<b>77</b>
V.1	Primärenergieverbrauch	77
V.2	Endenergieverbrauch	78
V.3	Stromerzeugung	82
<b>VI</b>	<b>Eigenarten von Windstrom und Solarstrom und die daraus resultierenden Probleme</b>	<b>85</b>
VI.1	Windstrom	85
VI.2	Solarstrom	88
VI.3	Gemeinsame Nutzung von Windstrom und Solarstrom.	91
<b>VII</b>	<b>Potenziale zur klimaneutralen Energieerzeugung</b>	<b>93</b>
VII.1	Windkraft	93
VII.2	Photovoltaik	94
VII.3	Solarthermie	95
VII.4	Wasserkraft	95
VII.5	Geothermie	95
VII.6	Bioenergie	97
VII.7	Zusammenfassung	101
<b>VIII</b>	<b>Möglichkeiten zur Speicherung elektrischer Energie</b>	<b>103</b>
VIII.1	Elektrische Speicherung	103
VIII.2	Mechanische Speicherung	104
VIII.3	Thermische Speicherung	105
VIII.4	Elektrochemische Speicherung	105
VIII.5	Speicherung in gasförmigen oder flüssigen Energieträgern	107
<b>IX</b>	<b>Übergang zu einer Stromerzeugung ohne fossile Energieträger</b>	<b>111</b>
IX.1	Ist-Situation: Keine Notwendigkeit zur Speicherung elektrischer Energie	111
IX.2	Zukünftige Situation: Notwendigkeit der Speicherung elektrischer Energie und des Baus von Reservekraftwerken	120
IX.3	Kostenaspekte	135
IX.4	Aspekte der Klimawirksamkeit	141

<b>X</b>	<b>Übergang zu einer nachhaltigen Energieerzeugung</b>	143
X.1	Auswirkungen der klimaneutralen Energieversorgung auf die einzelnen Wirtschaftssektoren	145
X.2	Kostenaspekte	184
X.3	Systemsteuerung	196
X.4	Aspekte der Klimawirksamkeit	202
X.5	Kompensation von CO <sub>2</sub> -Emissionen	203
<b>XI</b>	<b>Handlungsempfehlungen</b>	207
XI.1	Grundsätze einer nachhaltigen Ethik und Folgerungen daraus	207
XI.2	Gesetzliche Rahmenbedingungen zur Verminderung der CO <sub>2</sub> -Emissionen	217
<b>XII</b>	<b>Was ist zu tun?</b>	223
XII.1	Planerische Maßnahmen	225
XII.2	Gesetzgeberische Maßnahmen	228
<b>XIII</b>	<b>Internationale Aspekte</b>	245
<b>XIV</b>	<b>Resümee</b>	249
	Quellenverzeichnis	257

# Der Mensch hat einen erheblichen Anteil an der aktuellen Klimaerwärmung

## Abriss der Klimageschichte<sup>[1], [2], [3]</sup>

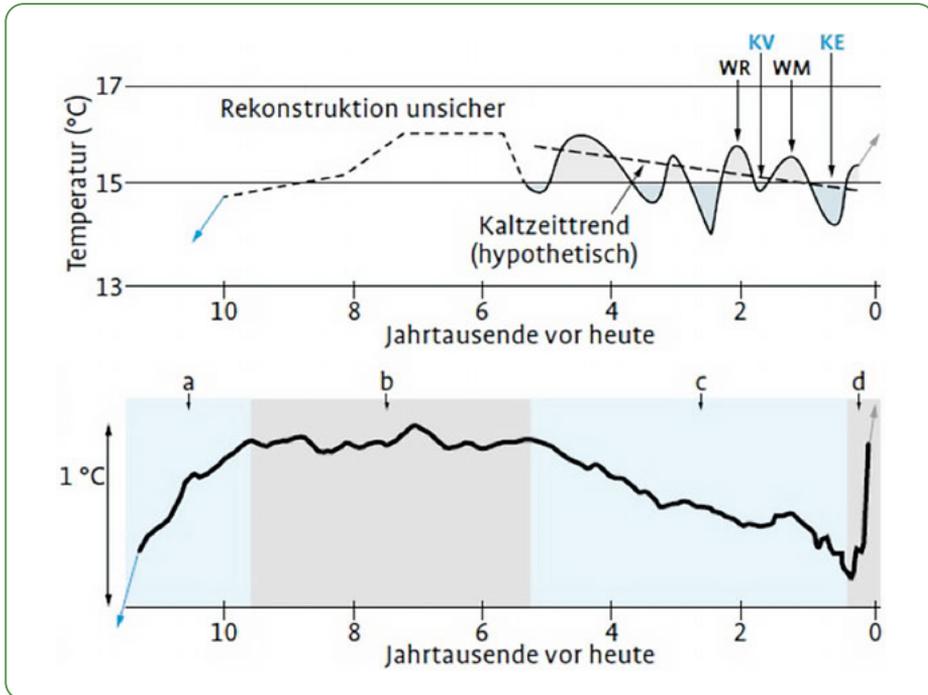
### a) Vorindustrielle Zeit

Im Verlauf der Erdgeschichte schwankte das Klima mit einem Zyklus von etwa 200 Millionen Jahren zwischen Eisphasen mit globalen Temperaturen (über die Erdoberfläche gemittelte Temperaturen) zwischen 3 °C und 10 °C und Warmphasen mit globalen Temperaturen zwischen 17 °C und 28 °C. In den Eisphasen waren zumindest die Pole vollständig mit Eis bedeckt, in den Warmphasen wurden sie eisfrei. Die Eisphasen dauerten zwischen 50 und 100 Millionen Jahre, die Warmphasen zwischen 30 und 50 Millionen Jahre.

Wir befinden uns heute in einem frühen Zeitpunkt einer Eisphase, die vor 2,5 Millionen Jahren begann. Während der zurückliegenden 1 Million Jahre wechselten in einem Zyklus von etwa 100.000 Jahren Kaltzeiten und Warmzeiten. Die letzte Kaltzeit, die Würmkaltzeit, begann vor etwa 110.000 Jahren. Die Globaltemperatur sank bis auf 5 °C ab, 32 % der Erde waren mit Eis bedeckt. Der Meeresspiegel lag 130 Meter unter seinem heutigen Pegel. Die tropischen Regenwälder in Zentralafrika schrumpften auf ihre minimale Ausdehnung; die Sahara erreichte ihre maximale Ausdehnung. Vor etwa 11.000 Jahren begann die Warmzeit, auch Holozän genannt (Abbildung 1), in der wir uns heute noch befinden.

Die vorangegangene Warmzeit begann vor etwa 126.000 Jahren und endete vor etwa 115.000 Jahren. Sie dauerte 11.000 Jahre, sodass zu erwarten steht, dass auch die heutige Warmzeit irgendwann zu Ende geht. Während der heutigen Warmzeit kam es immer wieder zu Klimaschwankungen. In einem ersten Klimaopti-

Der Mensch hat einen erheblichen Anteil an der aktuellen Klimaerwärmung



**Abbildung 1:** Temperaturvariationen im Holozän.

Oben: ältere Rekonstruktion der nordhemisphärischen Mittelwerte (nach CLARK 1982) kombiniert mit der Grönland-Rekonstruktion (von DANSGAARD 1975).

Unten: global gemittelte Rekonstruktion (nach MARCOTT 2013)

(Quelle: Christian D. Schönwiese, »Klimatologie«, 5. Auflage, Ulmer Verlag Stuttgart 2020).

mum des Holozäns, das sein Maximum mit Temperaturen von 1 bis 2 °C über den heutigen etwa vor 6.000 bis 7.000 Jahren erreichte, verschwanden die Eisschilde in Nordeuropa und Nordamerika. Die Regenwälder in Zentralafrika dehnten sich aus, und die Sahara war Grünland. Der Tschadsee erreichte eine ähnliche Größe wie das Kaspische Meer. Im Gebiet des heutigen Syriens, des Irans und des Iraks entstand erster Ackerbau. Die Menschen, die bisher als Sammler und Jäger gelebt hatten, wurden sesshaft und betrieben neben Ackerbau auch Viehzucht sowie Vorratswirtschaft. Die Erwärmung führte beispielsweise dazu, dass die Ostsee, damals ein aufgestauter Eissee, ins Meer abfließen konnte. Dabei sank ihr Wasserstand um 26 Meter. Flora und Fauna änderten sich erheblich. Viele der großen Säugetiere der Eiszeit starben aus. Die von der Eislast befreite Erdkruste hob sich

bis heute um etwa 300 Meter. Noch heute heben sich Landstriche in Skandinavien um bis zu 1 Zentimeter pro Jahr. Infolge des wärmer werdenden Klimas wich die Tundravegetation zurück und machte einer Bewaldung Platz.

Zwischen etwa 6.000 und 5.000 v. h. (vor heute) erfolgte eine Abkühlung mit einer Dürreperiode in Afrika, während der der Tschadsee fast austrocknete und die Sahara wieder zur Wüste wurde. Während eines zweiten Klimaoptimums des Holozäns von etwa 5.000 bis 3.500 v. h. entwickelte sich die ägyptische Hochkultur. Die Alpenpässe konnten problemlos überquert werden, was der Eismann Ötzi bezeugt.

Nach 3.500 v. h. schaukelte das Klima zu einer kalten Periode und dann über eine warme Periode zu dem Klimapessimum der Bronzezeit mit den bisher niedrigsten Temperaturen des Holozäns. Es dauerte bis etwa 2.500 v. h. an und war eine der Ursachen für den Niedergang des ägyptischen Reiches infolge von Dürreperioden und dem Ausbleiben des Nilhochwassers. Während dieses Klimapessimums breiteten sich die alpinen Gletscher aus. Anschließend kippte das Klima erneut, und von etwa 2.300 bis 1.600 v. h. herrschte das Klimaoptimum der Römerzeit (Pfeil WR in Abbildung 1), innerhalb dessen das Römische Reich aufblühte. Die Vergletscherung der Alpen ging stark zurück: Die Gletscherzungen endeten etwa 300 Meter höher als heute. Hannibal überquerte die Alpen. Die Römer bauten Wein auf den Britischen Inseln an. Eine anschließende Klimaverschlechterung (Pfeil KV in Abbildung 1) führte zu Völkerwanderungen und war möglicherweise eine der Ursachen für den Niedergang des Römischen Reiches. Im 8. und 9. Jahrhundert n. Chr. erfolgte eine als mittelalterliche Klima-anomalie bezeichnete Erwärmung (Pfeil WM in Abbildung 1), innerhalb der die Wirtschaft in Mitteleuropa aufblühte. In dieser Zeit entstanden die von uns heute bewunderten gotischen Kathedralen. Die Wikinger besiedelten damals Grönland. Schwere Sturmfluten führten zur Abtrennung der Friesischen Inseln vom Festland. Anschließend kühlte sich das Klima ab, und Europa erlebte eine kleine Eiszeit (Pfeil E in Abbildung 1), in der die Gemälde von Pieter Bruegel entstanden, die den tiefen Winter in den Niederlanden darstellen. Nach einer Phase der Erwärmung führten nasskalte Winter zu Beginn des 19. Jahrhunderts zu Hungersnöten und verursachten die Auswanderung zahlreicher Europäer nach Amerika. Ab 1850 normalisierte sich das Klima.

Während in der oberen Kurve der Abbildung 1 die gemittelten Temperaturwerte der Nordhalbkugel angegeben sind, gibt die untere Kurve die global gemittelten Temperaturwerte an. »a« bezeichnet einen Temperaturanstieg von etwa

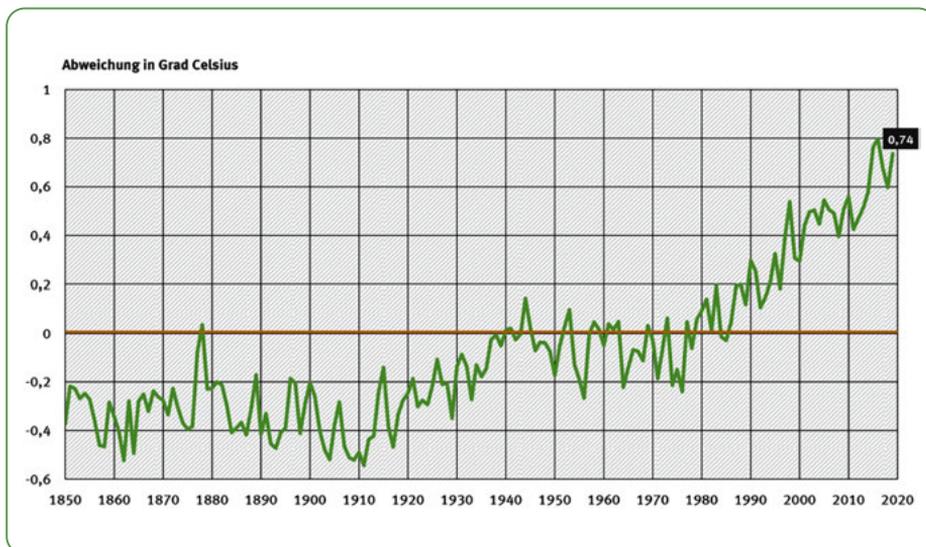
Der Mensch hat einen erheblichen Anteil an der aktuellen Klimaerwärmung

0,5 °C zu Beginn des Holozäns, »b« bezeichnet eine etwa 4.000 Jahre andauernde Phase annähernder Temperaturkonstanz, »c« bezeichnet eine Abkühlung des Klimas um etwa 0,7 °C während fast 4.000 Jahren, und »d« bezeichnet die rasche Klimaerwärmung um inzwischen mehr als 1 °C seit Beginn des Industriezeitalters. Global gemittelt beträgt die Temperaturdifferenz zwischen der letzten Kaltzeit und dem Holozän etwa 4 bis 5 °C.

## b) Industrielle Zeit

Die Temperaturwerte der vorindustriellen Zeit beruhen auf Messungen an Eisbohrkernen, Jahresringen von Bäumen, Schilderungen in der Literatur und anderem mehr. Sie wurden also indirekt ermittelt und sind daher mit Unsicherheiten behaftet. Seit etwa 1850 liegen direkte Temperaturmessungen vor (Abbildung 2).

Nach 1850 kam die Abnahme der mittleren Temperatur zum Stillstand. Zwischen 1850 und 1910 blieb sie etwa konstant, um dann von 1910 bis 1940 um etwa 0,3 °C anzusteigen, zwischen 1940 und 1980 etwa konstant zu bleiben und von 1980 bis 2020 sehr rasch um etwa 0,7 °C anzusteigen.



**Abbildung 2:** Abweichung der globalen Lufttemperatur vom Durchschnitt 1961 bis 1990  
(Quelle: Umweltbundesamt - [www.umweltbundesamt.de/bild/abweichung-der-globalen-lufttemperatur-vom/](http://www.umweltbundesamt.de/bild/abweichung-der-globalen-lufttemperatur-vom/) / Met Office Hadley Centre, Climate Research Unit).

## Natürliche Ursachen der Klimaschwankungen<sup>[1], [4], [5], [6], [7]</sup>

Das Klima, das heißt die mittlere Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Winde, ist das Ergebnis zahlreicher Einflussgrößen, die miteinander in stabilisierenden und destabilisierenden Wechselwirkungen stehen. Klimaänderungen können sich auf Regionen beschränken oder global sein, das heißt sich auf die gesamte Erde erstrecken. Im Verlauf der Erdgeschichte treten ständig Klimaschwankungen auf. Sie haben erhebliche Auswirkungen auf Flora und Fauna, die Lebensbedingungen, die Wirtschaft, das Wohlergehen der Menschen und deren Migrationen.

Temperaturänderungen der Erdoberfläche sind das Ergebnis unterschiedlichster Einflüsse, aufgrund derer sich die auf eine Flächeneinheit der Erdoberfläche treffende Strahlungsleistung der Sonne und der von der Flächeneinheit in den Weltraum zurückgelangende Teil der Strahlungsleistung verändern. Zu den externen Einflüssen gehören unmittelbare Schwankungen der Strahlungsleistung der Sonne, die eine Periodizität von etwa 11 Jahren und weitere Periodizitäten aufweisen und als in ihrer Anzahl schwankende Sonnenflecken beobachtbar sind, sowie periodische Änderungen der Umlaufbahn der Erde um die Sonne und des Winkels, den die Rotationsachse der Erde mit der Bahnebene bildet.

Die Exzentrizität der elliptischen Erdbahn ändert sich mit einer Periode von etwa 100.000 Jahren zwischen annähernd kreisförmig und leicht elliptisch und durchläuft etwa alle 400.000 Jahre ein Maximum. Derzeit beträgt der minimale Abstand zwischen Erde und Sonne, der im Winter erreicht wird, etwa 142 Millionen km, während der maximale Abstand, der im Sommer erreicht wird, etwa 152 Millionen km beträgt. Das Perihel (geringster Abstand zwischen Erde und Sonne) der Erdbahn dreht sich etwa alle 112.000 Jahre einmal um die Sonne. Die Neigung der Erdachse relativ zur Erdbahnebene schwankt mit einer Periode von 40.000 Jahren zwischen 24,5 und 22,1 Grad. Die Erdachse rotiert innerhalb von 23.000 Jahren um die Drehachse der Erde. Die durch diese externen Einflüsse bedingten Veränderungen der auf unterschiedliche Bereiche der Erde auftreffenden Strahlungsleistung bewirken auf der Erde klimawirksame Veränderungen. Dazu gehören unter anderem Änderungen der Vereisung und der Vegetation, die wiederum Veränderungen der von der Erdoberfläche absorbierten und reflektierten Strahlungsenergie bewirken, sowie Veränderungen von Meeresströmungen,

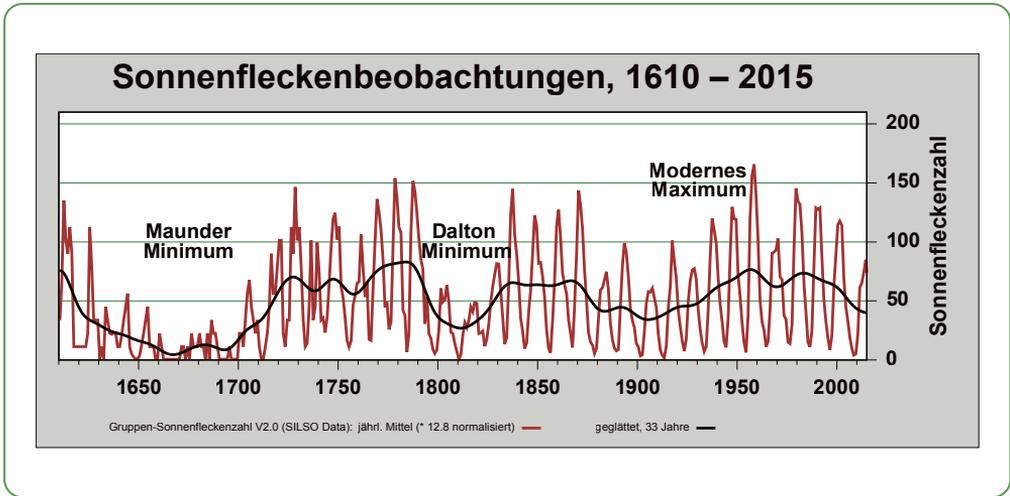
Der Mensch hat einen erheblichen Anteil an der aktuellen Klimaerwärmung

des Wassergehaltes und des CO<sub>2</sub>-Gehaltes der Atmosphäre aufgrund von Temperaturänderungen beim Oberflächenwasser. Zu diesen durch die Sonnenstrahlung verursachten Änderungen des Klimas kommen weitere Veränderungen mit natürlichen Ursachen, etwa Vulkanausbrüche, Brände, Schmelzen von Permafrostböden und anderes mehr.

Die Sonnenflecken und die Änderungen des Abstandes zwischen Erde und Sonne haben Auswirkungen auf die Gesamtstrahlung, die auf die Erde trifft. Infolge der Sonnenflecken schwankt die auf die Erde treffende Sonnenstrahlung um weniger als 0,15 %. Infolge der Änderung des Abstandes zwischen Erde und Sonne schwankt die auf die Erde treffende Sonnenstrahlung im Laufe eines Jahres um etwa 20 %, wobei sie paradoxerweise im Winter größer ist als im Sommer. Maßgeblicher für die auf eine Flächeneinheit der Erde gelangende Strahlungsdichte ist die Neigung dieser Flächeneinheit zu der einfallenden Strahlung, die sich entsprechend einer Sinusfunktion ändert. Auf einer nördlichen Breite der Erdhalbkugel von 48 Grad schwankt der Einfallswinkel der Sonnenstrahlung zwischen etwa 65 Grad im Sommer (entsprechend einem Sinus von 0,90) und etwa 19 Grad im Winter (entsprechend einem Sinus von 0,32). Die infolge des unterschiedlichen Einfallswinkels auf eine Flächeneinheit fallende Strahlungsleistung in einer geografischen Breite von 48 Grad Nord ist im Sommer also etwa dreimal so hoch wie im Winter. Demgegenüber spielt die durch den unterschiedlichen Abstand zwischen Erde und Sonne im Sommer und Winter verursachte Änderung der Strahlungsleistung kaum eine Rolle. Die jahreszeitlichen Schwankungen der auf eine Flächeneinheit gelangenden Strahlungsleistung sind auf der Nordhalbkugel umso ausgeprägter, je näher die Flächeneinheit dem nördlichen Polarkreis (66,5 Grad) ist.

Zahlreiche Schwankungen des Erdklimas können plausibel durch einzelne der vorgenannten Einflüsse oder deren Überlagerung erklärt werden.

Abbildung 3 zeigt den zeitlichen Verlauf der Anzahl der Sonnenflecken seit dem Jahr 1600. Deutlich sichtbar ist der 11-jährige Zyklus (Schwabe-Zyklus), der sich in der Anzahl der dunklen Sonnenflecken zeigt. In diesen dunklen Oberflächenbereichen ist der Energietransport aus dem Sonneninneren geschwächt. Dennoch ist die auf die Erde treffende Solarstrahlung in Zeiten hoher Sonnenflecken bzw. hoher Sonnenaktivität wegen besonders hoher Abstrahlungen an den Rändern der Sonnenflecken vergrößert. Das Maunder-Minimum, innerhalb dessen kaum Sonnenflecken auftraten, korreliert gut mit der Kleinen Eiszeit. Das Dalton-Minimum korreliert ebenfalls mit einer Abkühlung des Klimas. Vulkanausbrüche mit



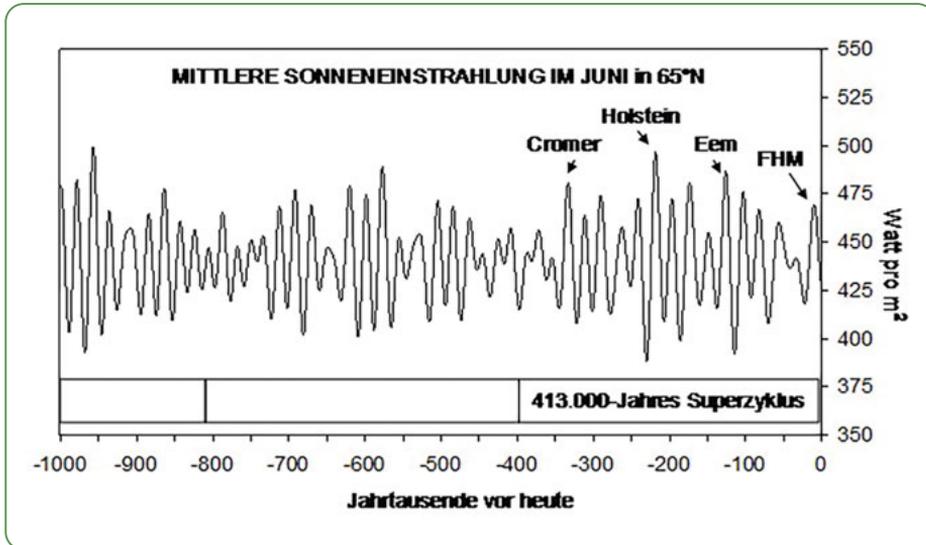
**Abbildung 3:** 400 Jahre Sonnenfleckenbeobachtung  
 (Quelle: DeWikiMan / <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sunspots-gn-yr-total-smoothed-de.svg> / CC BY-SA 4.0).

hohen Partikelemissionen in die Atmosphäre sind eine weitere Ursache dafür. So führte der Ausbruch des Krakatau im Jahr 1883 dazu, dass sich die Temperatur der Erdoberfläche unterhalb der in die Atmosphäre emittierten Partikel um bis zu 3 °C abkühlte. Diese Abkühlung endete mit der Absetzung der Partikel auf der Erdoberfläche.

Für den mit längeren zeitlichen Abständen erfolgenden Wechsel zwischen Warm- und Kaltzeiten werden die astronomischen Klimaantriebe als ursächlich angesehen. Wenn sich eine starke Exzentrizität der Erdbahn, eine starke Neigung der Erdachse relativ zur Ebene der Erdbahn und eine Sonnennähe oder Sonnenferne gleichzeitig günstig oder aber ungünstig auf die Bestrahlung eines Gebietes der Erdoberfläche auswirken, können dadurch deutliche Unterschiede in der Bestrahlungsstärke auftreten. Die Einflüsse der astronomischen Klimaantriebe lassen sich für die Vergangenheit und die Zukunft genau berechnen, da sie durch physikalische Gesetze der Mechanik gegeben sind.

Abbildung 4 zeigt eine Berechnung für die Sommer in der für die Klimaentwicklung empfindlichen Zone um 65 Grad nördlicher Breite, wo sich die großen Landmassen Sibiriens und Kanadas befinden. Die Pfeile zeigen auf die Einstrahlungsmaxima der letzten drei Warmzeiten und des frühholozänen Maximums

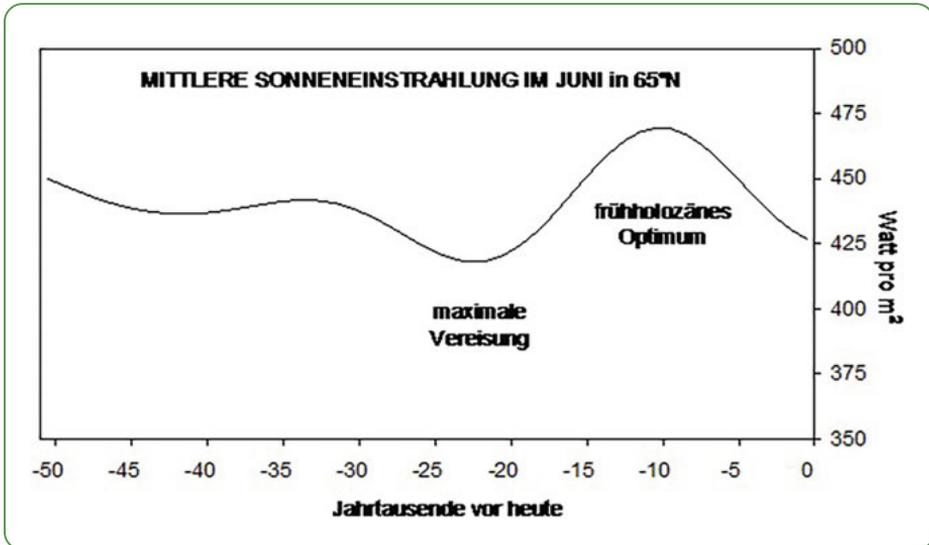
Der Mensch hat einen erheblichen Anteil an der aktuellen Klimaerwärmung



**Abbildung 4:** Änderung der Sonneneinstrahlung infolge zyklischer Schwankungen der Erdbahn (Quelle: Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, ZAMG, Wien, Österreich. / [www.zamg.ac.at/cms/de/images/klima/bild\\_ip-klimawandel/klimasystem/antriebe/2-2-3\\_3\\_erdbahnparameter\\_summe](http://www.zamg.ac.at/cms/de/images/klima/bild_ip-klimawandel/klimasystem/antriebe/2-2-3_3_erdbahnparameter_summe) / dort: Abbildung 3, oben).

(FHM). Die letzten vier Warmzeiten sind durch markante Einstrahlungsmaxima gekennzeichnet.

Abbildung 5 ist ein vergrößerter Ausschnitt aus Abbildung 4 und zeigt den Verlauf der Sonneneinstrahlung während der zurückliegenden 50.000 Jahre. Deutlich sichtbar ist eine mit maximaler Vereisung verbundene Strahlungsminderung vor 20.000 bis 24.000 Jahren und eine mit einem Rückgang der Vereisung verbundene stärkere Strahlung vor 12.000 bis 7.000 Jahren. Die durch die astronomischen Klimaantriebe verursachten, über Jahrtausende andauernden strahlungsschwachen und strahlungsstarken Zeiträume bewirken nicht nur eine Zunahme und Abnahme der Vereisung, sondern lösen weitere Vorgänge aus, die diese Prozesse verstärken oder abschwächen. Ein Beispiel für eine positive Rückkopplung ist die bei Abnahme der Vereisung zunehmende Strahlungsabsorption der eisfreien Erd- oder Wasseroberfläche, die eine zusätzliche Erwärmung der Erdoberfläche bewirkt (positive Rückkopplung) und dadurch den Übergang in eine Warmzeit unterstützt. Beim Übergang in eine Kaltzeit reflektiert die zunehmende helle bzw. weiße Schnee- oder Eisoberfläche weniger Strahlungsenergie als die vor-



**Abbildung 5:** Änderung der Sonneneinstrahlung infolge zyklischer Schwankungen der Erdbahn (Quelle: Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, ZAMG, Wien, Österreich. / [www.zamg.ac.at/cms/de/images/klima/bild\\_ip-klimawandel/klimasystem/antriebe/2-2-3\\_3\\_erdbahnparameter\\_summe](http://www.zamg.ac.at/cms/de/images/klima/bild_ip-klimawandel/klimasystem/antriebe/2-2-3_3_erdbahnparameter_summe) / dort: Abbildung 3, unten).

her eisfreie Oberfläche, wodurch die Temperaturabnahme der Erdoberfläche verstärkt wird.

Temperaturänderungen der Erdoberfläche haben Auswirkungen auf Meeresströmungen, Winde, die Zusammensetzung der Atmosphäre usw. So bewirken steigende Temperaturen eine Zunahme der Verdampfung des Wassers und der Ausdampfung von im Wasser gelösten Gasen, beispielsweise Kohlendioxid. Erwärmungen führen zu zusätzlichem Pflanzenwachstum, was wiederum die Menge des von den Pflanzen aufgenommenen Kohlendioxids vergrößert.

Wasserdampf und Kohlendioxid gehören zu den sogenannten Treibhausgasen, die für unser Klima und das Leben auf der Erde wichtig sind. Der Treibhauseffekt wird im Folgenden erläutert:

Die Leistung der von der Sonne auf die Erde gerichteten Strahlung beträgt im Mittel etwa  $1.368 \text{ W/m}^2$ . Diese Leistung gelangt auf die Querschnittsfläche der Erde. Die Oberfläche der Erdkugel ist viermal so groß wie deren Querschnittsfläche, sodass sie bei fehlender Atmosphäre im Mittel mit einer Leistung von  $342 \text{ W/m}^2$  bestrahlt würde. Hätte die Erde keine Atmosphäre, durch welche die auf

Der Mensch hat einen erheblichen Anteil an der aktuellen Klimaerwärmung

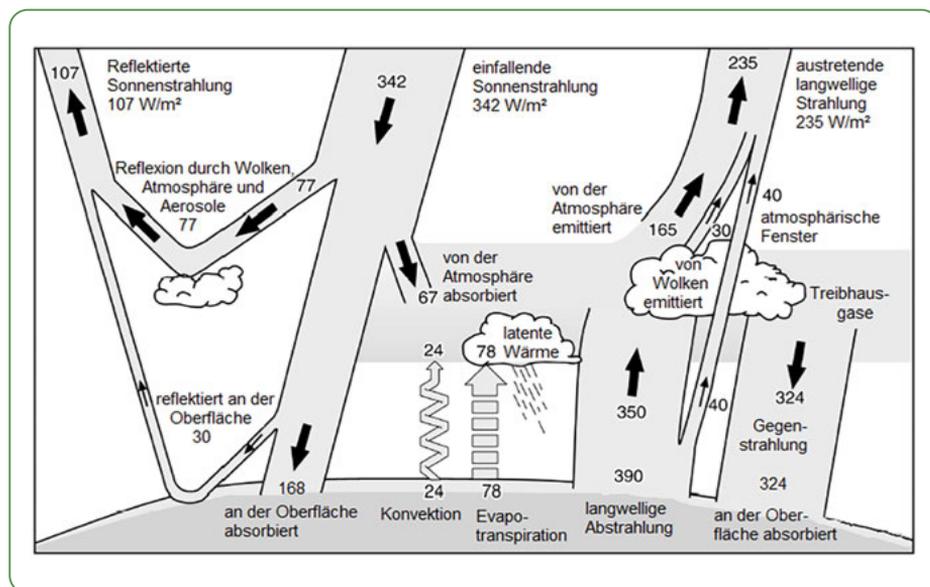
sie gelangende Sonnenstrahlung und die von ihr reflektierte Strahlung verändert wird, so ergäbe sich aufgrund des Strahlungsgesetzes von Stefan und Boltzmann bei im Temperaturgleichgewicht befindlicher Erdoberfläche Folgendes:

$$342 \text{ [W/m}^2\text{]} \times (1 - \alpha) = \sigma \text{ [W/m}^2 \text{ K}^4\text{]} \times T^4.$$

Dabei ist  $\alpha$  der unmittelbar von der Erdoberfläche reflektierte Anteil der auf die Erdoberfläche gelangenden Strahlungsleistung (etwa 30 %),  $\sigma$  die Stefan-Boltzmann-Konstante ( $5,67 \times 10^{-8} \text{ [W/m}^2 \text{ K}^4\text{]}$ ) und  $T$  die Temperatur der Erdoberfläche in Kelvin.

Die Rechnung ergibt eine Oberflächentemperatur von etwa 255 °K (-18 °C), also eine unwirtliche Temperatur, bei der sich auf der Erde, deren tatsächliche Oberflächentemperatur etwa 15 °C beträgt, nicht das heutige Leben entwickelt hätte. Grund für diese höhere Temperatur ist der Treibhauseffekt, welcher von der die Erde umgebenden Atmosphäre verursacht wird [8].

Von der vom Weltraum (Abbildung 6) her auf die Erdatmosphäre gelangenden kurzwelligigen Sonnenstrahlung von 342 W/m<sup>2</sup> werden etwa 77 W/m<sup>2</sup> von der



**Abbildung 6:** Energiebilanz der Erde (Quelle: Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, ZAMG, Wien, Österreich. / [https://www.zamg.ac.at/cms/de/images/klima/bild\\_ip-klimawandel/klimasystem/umsetzungen/2-3-1\\_1\\_energiebilanz/view](https://www.zamg.ac.at/cms/de/images/klima/bild_ip-klimawandel/klimasystem/umsetzungen/2-3-1_1_energiebilanz/view)).

Atmosphäre unmittelbar in den Weltraum zurückgeworfen und  $67 \text{ W/m}^2$  von der Atmosphäre absorbiert, was zu ihrer Aufheizung führt. Von der durch die Atmosphäre hindurch in Richtung auf die Erdoberfläche gelangenden Strahlung werden  $30 \text{ W/m}^2$  von der Erdoberfläche reflektiert, ohne diese aufzuheizen. Somit werden insgesamt  $107 \text{ W/m}^2$  in den Weltraum rückgestrahlt, während  $168 \text{ W/m}^2$  von der Erdoberfläche absorbiert werden und diese aufheizen.  $24 \text{ W/m}^2$  werden durch Wärmeleitung auf die Luft übertragen, Sie gelangen durch Konvektion in die Atmosphäre und heizen diese auf.  $78 \text{ W/m}^2$  werden durch Verdampfung von Wasser verbraucht und gelangen in Form von Kondensationswärme in die Atmosphäre, was diese aufheizt.

Infolge der Gleichgewichtstemperatur der Erdoberfläche von ungefähr  $288 \text{ °K}$  strahlt die Erde entsprechend dem Stefan-Boltzmann-Gesetz eine Leistung von  $390 \text{ W/m}^2$  im langwelligen Infrarotbereich ab. In diesem Frequenzbereich sind insbesondere Moleküle mit wenigstens 2 Atomen (wie  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_3$ ) zu Schwingungen anregbar und absorbieren in den Frequenzbereichen ihrer Eigenschwingungen Strahlungsenergie, um diese dann in alle Raumrichtungen abzustrahlen. Aufgrund ihrer Eigenschaft, kurzwellige Sonnenstrahlung weitgehend ungehindert durchzulassen, langwellige Strahlung jedoch in bestimmten Frequenzbereichen zu absorbieren und in alle Richtungen abzustrahlen, werden diese Gase Treibhausgase genannt. Sie sind für den natürlichen Treibhauseffekt verantwortlich, der dafür sorgt, dass die mittlere Oberflächentemperatur der Erde  $+15 \text{ °C}$  und nicht  $-18 \text{ °C}$  beträgt.

Abbildung 7 verdeutlicht die Strahlungsverhältnisse [9]. Im unteren Teil sind die Absorptionsspektren verschiedener Bestandteile der Atmosphäre dargestellt. Wasserdampf ist das mit großem Abstand wirksamste Treibhausgas.  $\text{CO}_2$  absorbiert in einem Bereich um  $15 \text{ }\mu\text{m}$ , in dem auch Wasserdampf absorbiert. Hier sei noch auf die starke Absorption von Ozon im Bereich von  $0,2$  bis  $0,3 \text{ }\mu\text{m}$ , also im kurzwelligen Ultraviolettbereich, hingewiesen, die uns vor der kurzwelligen, hautschädigenden Sonneneinstrahlung schützt und deren Intaktheit durch die inzwischen verbotenen Fluorkohlenwasserstoffe gefährdet war. Der obere Teil der Abbildung 7 verdeutlicht den Spektralbereich, in dem die kurzwellige Sonnenstrahlung auf die Erde gelangt und zeigt das im Bereich von  $10 \text{ }\mu\text{m}$  vorhandene Infrarotfenster, in dem die Wärmestrahlung der Erde weitgehend ungeschwächt durch die Atmosphäre hindurch nach außen gelangt. Messungen der von der Atmosphäre auf die Erde erfolgenden Rückstrahlung zeigen, dass im Längenwellenbereich des Durchlässigkeitsfensters kaum Strahlung rückgestrahlt wird.

Der Mensch hat einen erheblichen Anteil an der aktuellen Klimaerwärmung

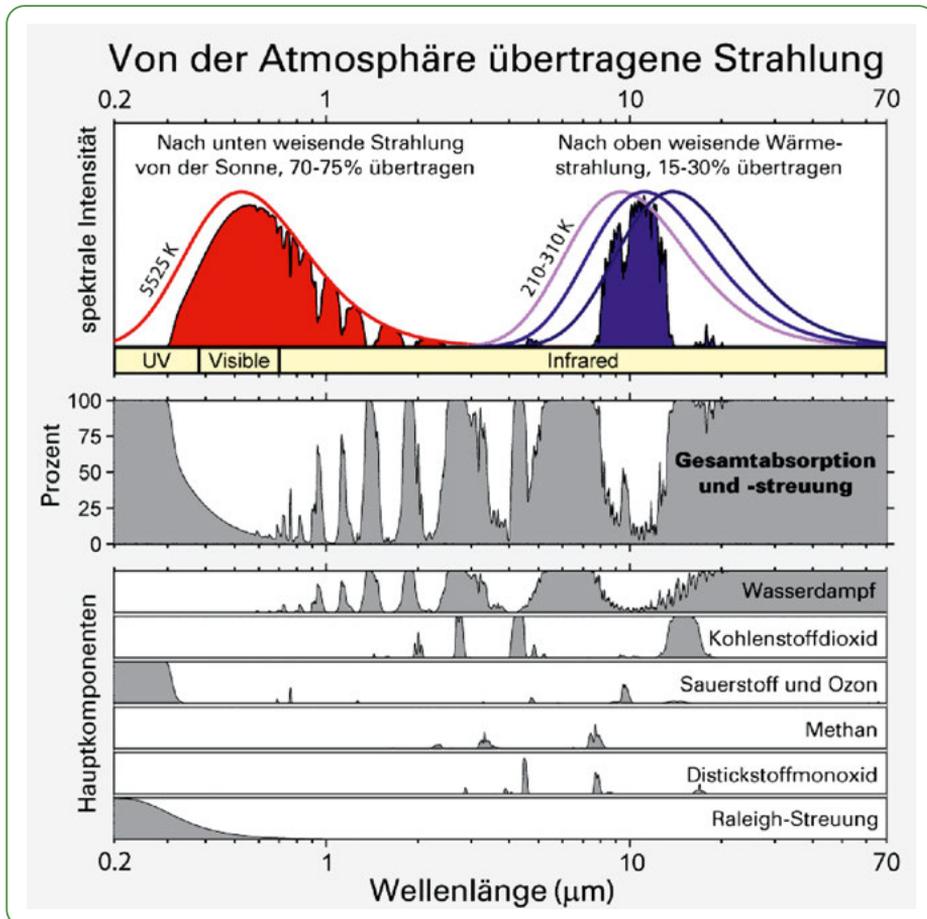


Abbildung 7: Von der Atmosphäre übertragene Strahlung

(Quelle: anonym / [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Atmospheric\\_Transmission\\_de.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Atmospheric_Transmission_de.png) / CC BY-SA 4.0).

Insgesamt werden, wie in Abbildung 6 dargestellt, von den im langwelligen Bereich abgestrahlten  $390 \text{ W/m}^2$  lediglich  $40 \text{ W/m}^2$  von der Atmosphäre weitgehend ungeschwächt durchgelassen.  $350 \text{ W/m}^2$  werden von den Treibhausgasen absorbiert. Davon werden  $324 \text{ W/m}^2$  als langwellige Gegenstrahlung auf die Erdoberfläche rückgestrahlt und  $30 \text{ W/m}^2$  in den Weltraum abgestrahlt.

Insgesamt gelangt eine kurzwellige Sonnenstrahlung mit  $342 \text{ W/m}^2$  auf die Erdatmosphäre.  $107 \text{ W/m}^2$  werden als kurzwellige Strahlung in den Weltraum zurück-

gestrahlt.  $235 \text{ W/m}^2$  werden im langwelligen Bereich in den Weltraum zurückgestrahlt, sodass insgesamt ein Energiegleichgewicht herrscht.

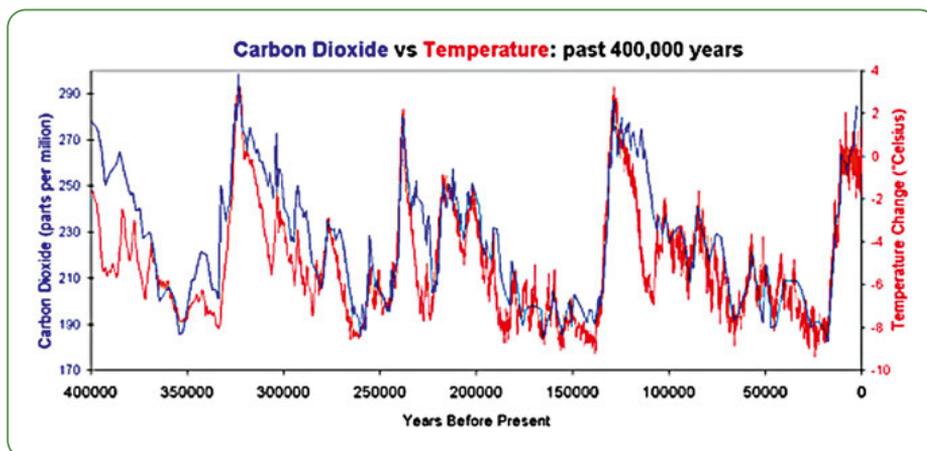
Die Erdoberfläche absorbiert  $168 \text{ W/m}^2$  an kurzwelliger Strahlungsleistung und  $324 \text{ W/m}^2$  an langwelliger Strahlungsleistung (Treibhausgegenstrahlung). Sie emittiert eine langwellige Strahlungsleistung von  $390 \text{ W/m}^2$ , das heißt sie hat einen Strahlungsleistungsgewinn von  $102 \text{ W/m}^2$ . Dieser wird dadurch kompensiert, dass die Erdoberfläche über Wärmetausch mit der Luft und in deren Konvektion  $24 \text{ W/m}^2$  sowie über die Verdampfung und die Kondensation von Wasser  $78 \text{ W/m}^2$  an die Atmosphäre abgibt. Somit befindet sich die Erdoberfläche im Energiegleichgewicht.

Die Atmosphäre absorbiert eine kurzwellige Strahlungsleistung von  $67 \text{ W/m}^2$ , eine langwellige Strahlungsleistung von  $350 \text{ W/m}^2$  und durch Erwärmung der Luft an der Erdoberfläche sowie durch Kondensation des an der Erdoberfläche verdampften Wassers  $102 \text{ W/m}^2$ , also insgesamt  $519 \text{ W/m}^2$ . Die Atmosphäre emittiert  $324 \text{ W/m}^2$  zur Erde und  $165 \text{ W/m}^2$  in die Atmosphäre, also insgesamt  $519 \text{ W/m}^2$ , sodass auch die Atmosphäre im Energiegleichgewicht ist.

Die vorgenannten Zahlen sind globale Mittelwerte. Der Anteil der auf die Erdoberfläche gelangenden Strahlung von der auf die äußere Atmosphäre einfallenden Sonnenstrahlung von im Mittel  $342 \text{ W/m}^2$  ist – abhängig von der Position eines Gebietes auf der Erdoberfläche – sehr unterschiedlich und umso größer, je steiler die Strahlung auf das Gebiet trifft. In dem Bereich um den Äquator ist die Sonneneinstrahlung erheblich stärker als fern dieser Region. Dies führt zu Temperaturunterschieden, infolge derer Winde, Wasserströmungen und Wasserverdunstungen entstehen, welche zu unterschiedlichen Niederschlägen führen. Das Klima der Welt ist insgesamt gekennzeichnet von einer innertropischen Konvergenzzone, in der warme Luft aufsteigt, sowie einer nördlichen subtropischen Hochdruckzone, in der die erwärmte Luft absinkt und aus der ein Teil der abgesunkenen Luft auf der Nordhalbkugel als Nordost-Passat zur innertropischen Konvergenzzone rückströmt und ein anderer Teil als südwestlicher Wind in einer Westwinddrift in Gegenrichtung abströmt. In Nähe des Nordpols sinkt kalte Luft ab und strömt als polarer Ostwind in nordöstlicher Richtung ab. Diese polare kalte Windströmung trifft auf die wärmere Westwinddrift, was zu instabilen Wetterlagen führt. Auf der Südhalbkugel laufen die Vorgänge in ähnlicher Weise ab. Mit den Luftströmungen sind erhebliche Energie- und Wassertransporte verbunden, die etwa die Vegetation an Land, die Lebensverhältnisse in den Ozeanen und die Zusammensetzung der Atmosphäre beeinflussen.

Der Mensch hat einen erheblichen Anteil an der aktuellen Klimaerwärmung

Abbildung 8 zeigt für die vergangenen 400.000 Jahre die Abweichungen der mittleren Oberflächentemperatur der Erde von der über das vergangene Jahrtausend gemittelten Oberflächentemperatur und die Änderungen der CO<sub>2</sub>-Konzentration [10]. Hier ist eine weitgehende Koinzidenz der Kurven zu verzeichnen. Die vier deutlich sichtbaren Maxima fallen exakt mit den Sonneneinstrahlungsmaxima zu den Höhepunkten der vier letzten Warmzeiten – Cromer, Holstein, Eem und FHM – zusammen, die in Abbildung 4 dargestellt sind. Menschliche Aktivitäten können die Schwankungen der Kohlendioxidkonzentration und der Temperatur nicht beeinflusst haben. Daher ist zu vermuten, dass die Verläufe der Temperatur und der CO<sub>2</sub>-Konzentration unmittelbar durch die Schwankungen der Sonneneinstrahlung verursacht wurden, die aufgrund von zyklischen Bahnänderungen und Änderungen der Stellung der Erdachse relativ zur Bahnebene aufgetreten sind. Auffällig ist, dass die Temperatur- und CO<sub>2</sub>-Maxima und -Minima etwa gleich hoch bzw. gleich tief sind, obwohl die Maxima und Minima der Sonneneinstrahlung (Abbildung 4) deutlich unterschiedlich sind. Die sägezahnartigen Temperatur- und CO<sub>2</sub>-Änderungen während der Übergänge von einer Warmzeit zu einer Kaltzeit verlaufen ähnlich steil wie der Übergang von einer Kaltzeit zu einer Warmzeit. Die Zeitdauern der sägezahnartigen Schwankungen beim Übergang von einer Warmzeit zu einer Kaltzeit sind ähnlich denen der periodischen



**Abbildung 8:** Kohlendioxidkonzentration und Temperatur während der zurückliegenden 400.000 Jahre (Quelle: [https://www.researchgate.net/figure/Temperature-change-over-the-past-400-000-years-correlate-closely-with-variations-in\\_fig1\\_308983884](https://www.researchgate.net/figure/Temperature-change-over-the-past-400-000-years-correlate-closely-with-variations-in_fig1_308983884) / John Cook, [www.skepticalscience.com](http://www.skepticalscience.com)),

Schwankungen der Sonneneinstrahlung zwischen den Warmzeiten (Abbildung 4). Tendenziell scheinen die CO<sub>2</sub>-Abnahmen den Temperaturabnahmen zeitlich verzögert zu folgen.

Wie aus Abbildung 6 ersichtlich, hat eine Änderung der einfallenden Sonnenstrahlung zahlreiche komplexe und sich gegenseitig beeinflussende Auswirkungen. Eine Zunahme der Sonneneinstrahlung führt zu einer Zunahme der Temperatur der Atmosphäre und der Oberfläche der Erde. Durch das Schmelzen von Eis vermindert sich das Reflexionsvermögen der Erde, sodass die Aufheizung zusätzlich unterstützt wird. Infolge der Erwärmung des Wassers erhöht sich der Wasserdampfgehalt der Atmosphäre, und infolge der mit zunehmender Temperatur geringeren Löslichkeit von Kohlendioxid im Wasser wächst die CO<sub>2</sub>-Konzentration. Beides verstärkt den Treibhauseffekt. Der infolge des höheren Wasserdampfgehaltes der Atmosphäre zunehmenden Neigung zu Wolkenbildung wirkt die höhere Temperatur der Atmosphäre entgegen. Das Abschmelzen von Eis und die höhere Oberflächentemperatur des Erdbodens bewirken verstärktes Pflanzenwachstum, was wiederum der Zunahme des CO<sub>2</sub>-Gehaltes der Atmosphäre entgegenwirkt. Dazu kommen Auswirkungen auf die Klimazonen und Meeresströmungen. Die enge Korrelation zwischen der Temperatur der Erdoberfläche und der CO<sub>2</sub>-Konzentration der Atmosphäre scheint maßgeblich durch die temperaturabhängige Löslichkeit von CO<sub>2</sub> in den Ozeanen bestimmt. Die Vereisung nimmt immer dann zu, wenn während der Sommermonate weniger Eis abschmilzt als in den Wintermonaten zuwächst. Zunehmende Vereisung führt zu abnehmendem Wasserdampfgehalt und abnehmender CO<sub>2</sub>-Konzentration und somit zu einem schwächeren Treibhauseffekt. Dadurch wird einerseits die Temperaturabsenkung unterstützt, andererseits aber wegen des geringeren Wasserdampfgehaltes auch die Vereisung verlangsamt.

Der in Abbildung 8 auffällige Unterschied zwischen dem raschen Übergang von einer Eiszeit in eine Warmzeit und der unstete Übergang von einer Warmzeit in eine Eiszeit könnten durch Folgendes bedingt sein: Bei weitgehend vereister Erde ist der Treibhauseffekt wegen der kalten, wasserdampf- und CO<sub>2</sub>-armen Atmosphäre gering, und ein großer Teil der kurzwelligen Sonnenstrahlung wird reflektiert, sodass die Erdoberfläche kaum aufgeheizt wird. Für eine Erwärmung, das heißt Auslösung des Übergangs in eine Warmzeit, ist eine starke Zunahme der Sonneneinstrahlung erforderlich, um die zu weiterer Erwärmung führenden positiven Rückkopplungen auszulösen. Bei weitgehend eisfreier Erdoberfläche wird ein größerer Teil der einfallenden kurzwelligen Sonnenstrahlung absorbiert, sodass

Der Mensch hat einen erheblichen Anteil an der aktuellen Klimaerwärmung

deren Rückgang sofort zu einer Abnahme der Temperatur und zu den damit einhergehenden, eine weitere Abkühlung unterstützenden positiven Rückkopplungen führt. Für eine detaillierte Erklärung der Zusammenhänge zwischen den Kurven der Abbildung 4 und 8 bedarf es weiterer Forschungsarbeiten.

## II.3

### Einfluss des Menschen

Der Treibhauseffekt ist Voraussetzung dafür, dass sich auf der Erde Flora und Fauna entwickeln konnten. Er wurde vom Homo sapiens kaum beeinflusst, solange dessen Eingriffe in die natürlichen Kreisläufe in der vorindustriellen Zeit klein waren. Das änderte sich mit der Industrialisierung. Mit der Erfindung der Dampfmaschine und später des Verbrennungsmotors wurde es möglich, durch

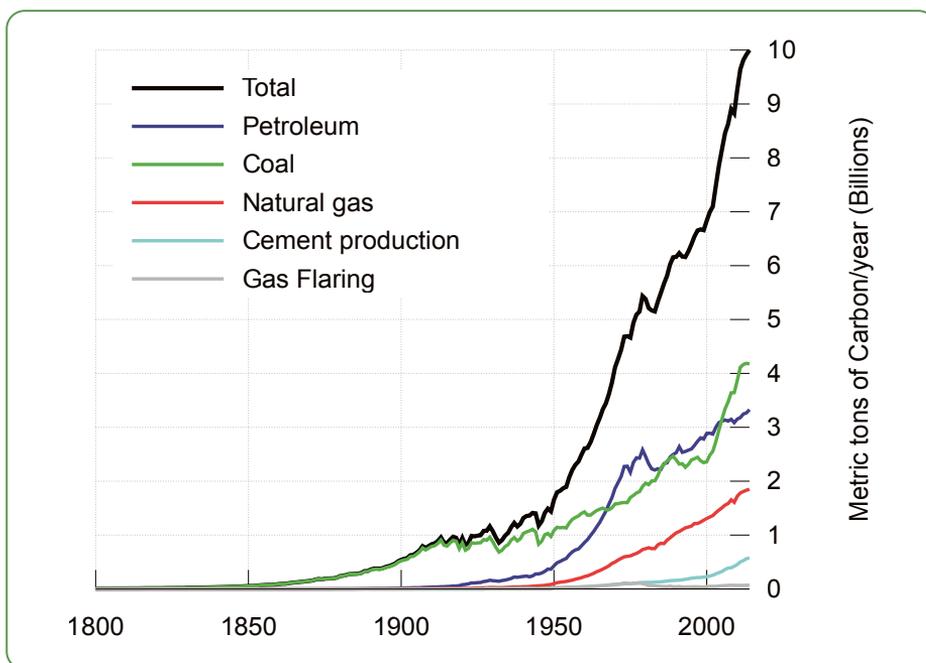


Abbildung 9: Kohlenstoffemissionen weltweit

(Quelle: Global\_Carbon\_Emission\_by\_Type\_to\_Y2004.png; Mak Thorpe derivative work: Autopilot (talk) / [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Global\\_Carbon\\_Emissions.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Global_Carbon_Emissions.svg) / CC BY-SA 3.0).

Verbrennung erzeugte Wärmeenergie in mechanische Energie umzuwandeln. Die Erfindung des elektrischen Generators und des Elektromotors ermöglichten es, mechanische Energie in elektrische und umgekehrt elektrische Energie in mechanische umzuwandeln. Mit der Industrialisierung etwa ab der Mitte des 19. Jahrhunderts setzte eine exponentiell zunehmende Nachfrage nach der Erzeugung von mechanischer Energie und Wärme ein, die durch Verbrennung fossiler Rohstoffe, zunächst vorwiegend von Kohle, dann zusätzlich von Erdöl und Erdgas, befriedigt wurde. Diese fossilen Energieträger sind im Lauf von Millionen Jahren aus organischem Material entstanden, das sich unter Luftabschluss und unter Druck in kohlenstoffreiche Verbindungen mit unterschiedlicher Kettenlänge und unterschiedlichem Wasserstoffgehalt umgewandelt hat. Dieser gebundene Kohlenstoff wird seit der Industriellen Revolution durch Verbrennung in Form von  $\text{CO}_2$  in die Atmosphäre emittiert. Bei der Erzeugung von 1 kWh Wärme aus Kohle werden 0,35 kg  $\text{CO}_2$  emittiert. Die entsprechenden Zahlen für Heizöl bzw. Erdgas (Methan) lauten 0,28 bzw. 0,20 kg. Die hohen  $\text{CO}_2$ -Emissionen bei der Verbrennung von Kohle rühren daher, dass Kohle im Wesentlichen nur aus Kohlenstoff

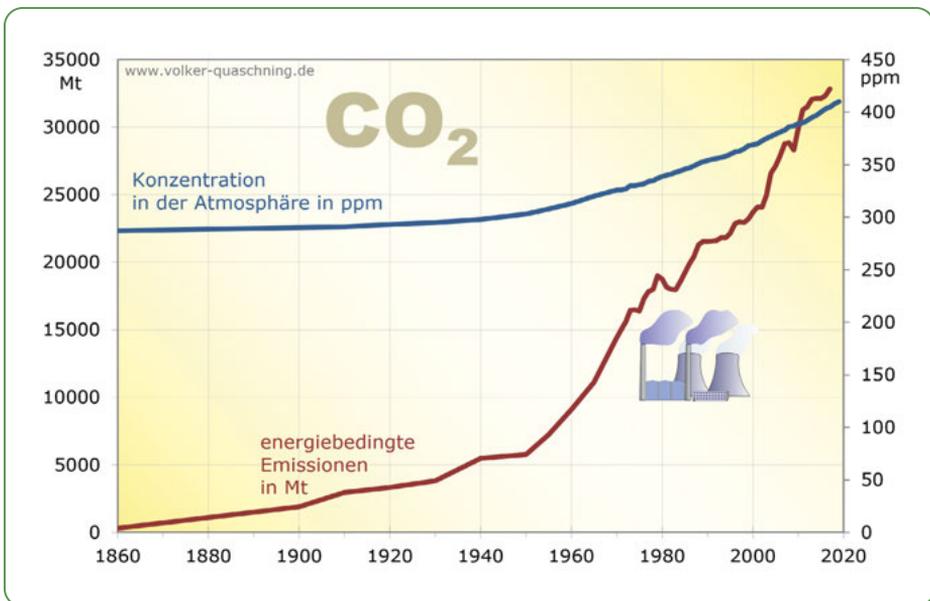
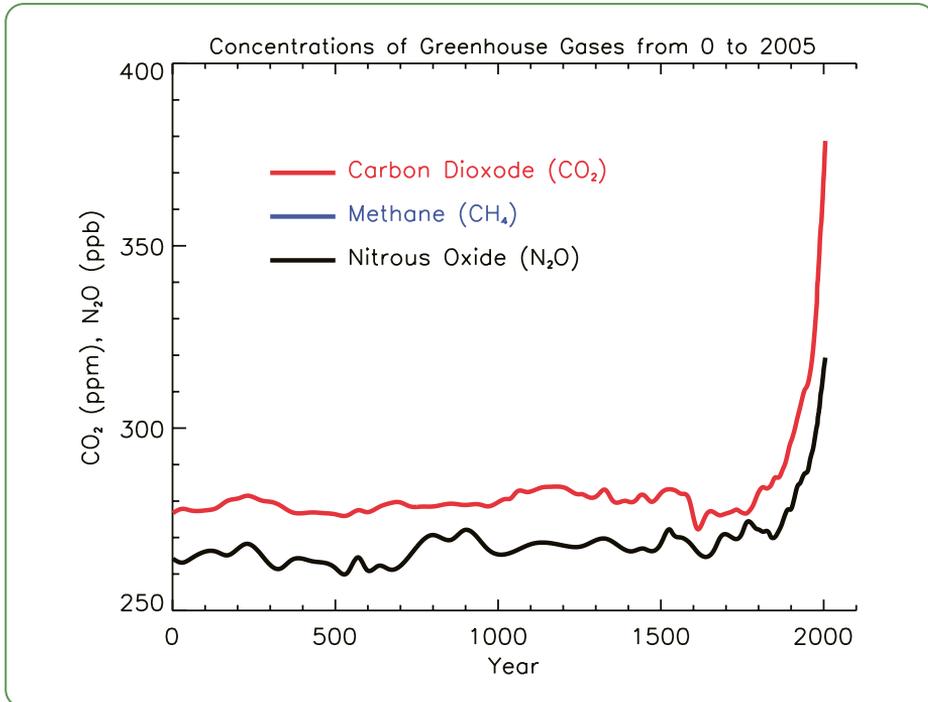


Abbildung 10: Emissionen in die und  $\text{CO}_2$ -Konzentration in der Atmosphäre  
(Quelle: <https://www.volker-quaschnig.de/datserv/CO2/index.php>).

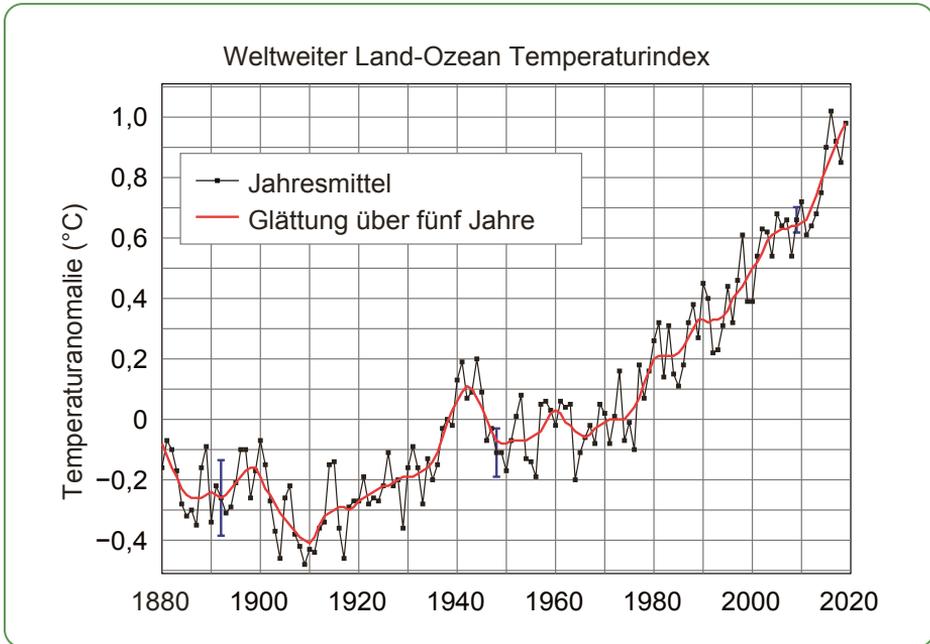
Der Mensch hat einen erheblichen Anteil an der aktuellen Klimaerwärmung



**Abbildung 11:** Konzentration wichtiger Treibhausgas (Quelle: bildungsserver wiki treibhausgase / Darstellung nach IPCC (2007): Climate Change 2007, Working Group I / FAQ, Figure 1: [www.ipcc.ch/report/ar4/wg1/changes-in-atmospheric-constituents-and-radiative-forcing](http://www.ipcc.ch/report/ar4/wg1/changes-in-atmospheric-constituents-and-radiative-forcing)).

besteht, während Erdöl und Erdgas in einem höheren Prozentsatz auch Wasserstoff enthalten, der unter Energieabgabe zu Wasser verbrennt.

Abbildung 9 zeigt die Zunahme des Eintrags von Kohlenstoff in die Atmosphäre seit 1850 [11]. Die Verbrennung von 1 t Kohlenstoff führt zu Emissionen von 3,6 t CO<sub>2</sub>. Wie Abbildung 10 zeigt, führten diese Emissionen zu einer Zunahme der CO<sub>2</sub>-Konzentration von etwa 280 ppm (parts per million) auf nunmehr über 400 ppm [12]. Die Erdatmosphäre enthält bei einer Konzentration von 400 ppm etwa 3.000 Gt CO<sub>2</sub>. Vom Jahr 1860 bis zum Jahr 2010 wurden etwa 1.800 Gt CO<sub>2</sub> emittiert. Nimmt man an, dass davon etwa die Hälfte durch die Ozeane aufgenommen wird, steigt die CO<sub>2</sub>-Konzentration dadurch rechnerisch um etwa 120 ppm. Dieser Wert entspricht etwa dem aus Abbildung 10 ablesbaren Messwert, wobei zusätzlich Emissionen infolge von Brandrodungen vor allem tropischer Urwälder und weitere Faktoren zu berücksichtigten sind.



**Abbildung 12:** Weltweiter Land-Ozean Temperaturindex

(Quelle: NASA Goddard Institute for Space Studies / [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Global\\_Temperature\\_Anomaly.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Global_Temperature_Anomaly.svg) / gemeinfrei).

Wie aus Abbildung 8 ersichtlich, schwankte die  $\text{CO}_2$ -Konzentration in den letzten 400.000 Jahren vor Beginn der Industrialisierung zwischen etwa 190 ppm in einer Kaltzeit und 280 ppm in einer Warmzeit.

Abbildung 11 zeigt, dass die  $\text{CO}_2$ -Konzentration in der Zeit von Christi Geburt bis etwa 1850 annähernd konstant war und um den Wert von 280 ppm schwankte [13]. Ähnliche Verhältnisse herrschten seit mehr als 10.000 Jahren. Dies ist ein Zeichen dafür, dass der natürliche Kohlenstoffkreislauf mit seinen riesigen Mengen, die von den Pflanzen als  $\text{CO}_2$  aufgenommen, in  $\text{O}_2$  und kohlenstoffhaltige Verbindungen umgewandelt und von den Lebewesen als  $\text{O}_2$  eingeatmet und als Nahrungsmittel aufgenommen werden, in einem insgesamt stabilen Gleichgewichtszustand war. Erst nach Beginn der Industriellen Revolution setzte die Zunahme der  $\text{CO}_2$ -Konzentration zunächst langsam ein und stieg dann nach 1900 in wachsendem Maße exponentiell an.

Abbildung 12 zeigt die Entwicklung der globalen Lufttemperatur von 1880 bis heute, bezogen auf die mittlere Globaltemperatur der Jahre 1951 bis 1980 [14]. Die

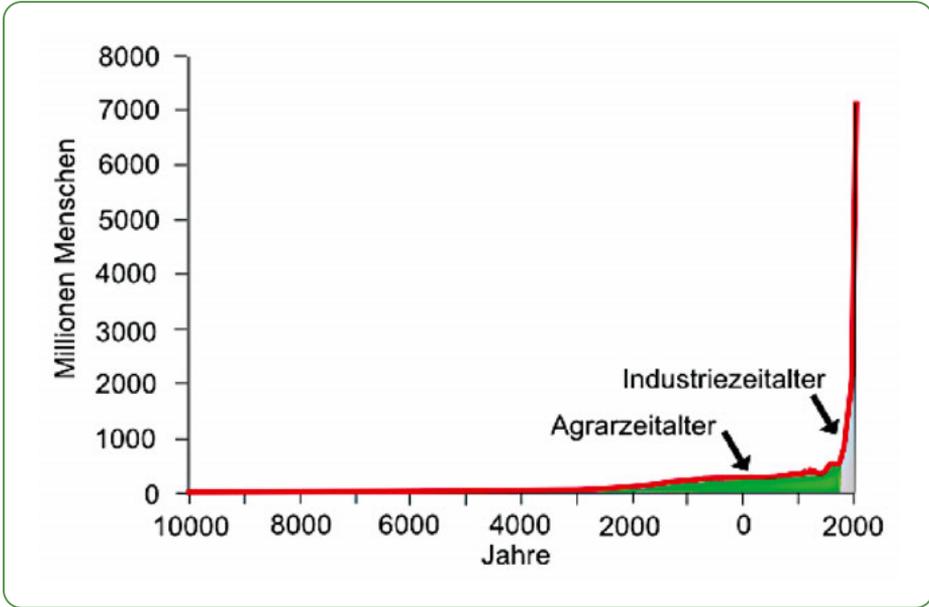
Der Mensch hat einen erheblichen Anteil an der aktuellen Klimaerwärmung

einzelnen schwarzen Punkte sind die über ein weltweit verteiltes Netz von Messpunkten gemessenen Jahresmittelwerte der Globaltemperatur. Ihre hohe Schwankung deutet auf den chaotischen Charakter des Wetters hin, das aufgrund zahlreicher Einflüsse und Rückkopplungen starke jährliche Schwankungen aufweist. Die rote Kurve, in der die Jahresmittelwerte jeweils gleitend über fünf Jahre gemittelt sind, verdeutlicht den Trend der Temperaturentwicklung. Sie zeigt abwechselnd Phasen sinkender Temperatur, zwischen denen sich längere Phasen zunehmender Temperatur befinden. Die Temperaturabnahme in den Phasen sinkender Temperatur wird seit 1900 immer schwächer. Seit 1990 wurde keine Phase abnehmender Temperatur mehr beobachtet.

Welche Ursachen können die seit 1880 beobachteten Temperaturänderungen haben?

Die in Abbildung 4 dargestellte, infolge von Änderungen der Erdbahn relativ zur Sonne und aufgrund von Änderungen der Stellung der Erdachse relativ zur Ebene der Bahn schwankende mittlere Sonneneinstrahlung kann nicht Ursache sein, denn einerseits ändert sich diese mittlere Sonneneinstrahlung im Lauf von 200 Jahren nur sehr wenig und andererseits befinden wir uns in einer abnehmenden Phase, die allenfalls ein schwaches Absinken der Temperatur verursachen könnte.

Eine Ursache könnten die in Abbildung 3 dargestellten Sonnenflecken sein. Die durch Änderungen der Sonnenflecken bedingte Änderung der auf die Erdoberfläche gelangenden Sonnenstrahlung liegt unter  $1 \text{ W/m}^2$  und kann mitursächlich für Temperaturschwankungen vor 1950 sein, wobei allerdings auch Vulkanausbrüche, etwa der des Krakatau 1893, Schwankungen der Aerosolkonzentrationen, der Meeresströmungen usw. als mögliche Ursachen gelten. Für den starken Temperaturanstieg seit 1950 kann die Sonnenfleckentätigkeit keinesfalls als Ursache angesehen werden: Wie aus Abbildung 3 ersichtlich, nimmt die Sonnenfleckentätigkeit seit 1950 mit kleinen Schwankungen insgesamt ab, was in Richtung einer Temperaturabnahme wirken würde. Erst seit der Industrialisierung steigt die Konzentration der klimawirksamen Gase, insbesondere das  $\text{CO}_2$ , durch menschliche Aktivitäten an. Sie führt mittlerweile zu einem zusätzlichen permanenten Strahlungsantrieb, der die Größe von mehreren  $\text{W/m}^2$  erreicht hat und die Schwankungen des natürlichen Strahlungsantriebs zunehmend übersteigt. Dies könnte erklären, warum die auf natürliche Schwankungen zurückgehenden Temperaturänderungen in der roten Kurve der Abbildung 12 zunehmend in den Hintergrund treten und von dem zusätzlichen Klimaantrieb überlagert werden, der



**Abbildung 13:** Entwicklung der Bevölkerungszahlen  
(Quelle: [www.oekosystem-erde.de/html/bevoelkerungszunahme.html](http://www.oekosystem-erde.de/html/bevoelkerungszunahme.html)).

durch die anthropogene Zunahme der klimawirksamen Gase bewirkt wird. Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass wir uns erdgeschichtlich in einer Abkühlungsphase von einer Warmphase zu einer Eisphase befinden. Der durch die Änderung der Erdbewegung langsam abnehmenden mittleren Sonneneinstrahlung (Abbildung 4) und der damit einhergehenden langsamen Abkühlung der Erde (Abbildung 8) wirkt die von der wachsenden Konzentration anthropogener Treibhausgase bedingte Erwärmung der Erde immer stärker entgegen und unterdrückt den globalen Trend zur Abkühlung.

Eine weitere Größe, die für die Klimaänderungen mitursächlich sein könnte, ist die in Abbildung 13 dargestellte Entwicklung der Weltbevölkerung [15]. Auffällig ist das starke Wachstum ab 1900, bedingt vor allem durch medizinischen Fortschritt. Die Zunahme des Kohlendioxids infolge der Ausatmung der Menschen hat keine Auswirkung auf den  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Atmosphäre und damit den Treibhauseffekt, denn das ausgeatmete  $\text{CO}_2$  entsteht letztlich aus der Verdauung von in Nahrungsmitteln enthaltenem Kohlenstoff, der von den Pflanzen der Atmosphäre entzogen wurde. Der fossile Energieverbrauch der Menschheit, der etwa

Der Mensch hat einen erheblichen Anteil an der aktuellen Klimaerwärmung

150.000 TWh pro Jahr beträgt, und der Energieverbrauch der Menschen selbst, der je Mensch etwa 2,3 kWh pro Tag und damit insgesamt etwa 5,7 TWh pro Jahr beträgt, wird zu einem großen Teil in Wärme umgewandelt, die der Erdoberfläche zugeführt wird. Der dadurch verursachte Energieeintrag ist tausendfach geringer als der Energieeintrag durch die Sonnenstrahlung und kann daher als Ursache für die Erderwärmung vernachlässigt werden. Die Zunahme der Weltbevölkerung führt jedoch zu zusätzlichen, mit CO<sub>2</sub>-Emissionen verbundenen Aktivitäten und zu einer Intensivierung der Landwirtschaft, wodurch zusätzlich zu CO<sub>2</sub> vor allem Methan und Distickstoffoxid (N<sub>2</sub>O) in die Atmosphäre emittiert werden. Brandrodungen zur Schaffung landwirtschaftlich nutzbarer Flächen tragen infolge des Verbrennens von Holz und aufgrund der fehlenden CO<sub>2</sub>-Speicherung infolge der fehlenden Bäume doppelt zur Zunahme der CO<sub>2</sub>-Emissionen bei. Der Weltklimarat IPCC schreibt 24 % des menschlichen Einflusses auf das Klima der Land- und Forstwirtschaft sowie veränderter Landnutzung zu [16].

**Tabelle 1:** Anthropogene Treibhausgase (Quelle: bildungsserver wiki Treibhausgase).

Gas	vorindustrielle Konzentration	Konzentration 2017	Verweildauer in der Atmosphäre (Jahre)	Treibhauspotenzial relativ zu CO <sub>2</sub>	RF (W/m <sup>2</sup> )
CO <sub>2</sub>	279 ppm	405 ppm	30–1.000	1	2,01
CH <sub>4</sub>	730 ppb	1.850 ppb	9,1	25	0,51
N <sub>2</sub> O	270 ppb	330 ppb	131	298	0,19
FCKW-12	0	504 ppt	100	5.200	0,16

Tabelle 1 zeigt Kennwerte der wichtigsten Treibhausgase [17].

Die vorindustrielle Konzentration bezieht sich etwa auf das Jahr 1750. Die Verweilzeit der Treibhausgase in der Atmosphäre ist maßgeblich für deren Treibhauswirksamkeit, da ein rasch abgebautes Treibhausgas weniger wirksam ist als ein über einen längeren Zeitraum in der Atmosphäre verbleibendes Treibhausgas. Das Treibhauspotenzial gibt an, um wie viel wirksamer gleiche Konzentrationen des jeweiligen Treibhausgases im Vergleich zur Wirksamkeit von CO<sub>2</sub> sind, wobei eine Verweilzeit von einheitlich 100 Jahren angenommen wird. RF (Radiative Forcing) gibt den Strahlungsantrieb bzw. die Strahlungsleistung an, die durch die im Vergleich zu 1750 zusätzliche/höhere Konzentration des jeweiligen Treibhausgases im Jahr 2017 auf die Erdoberfläche gelangt.

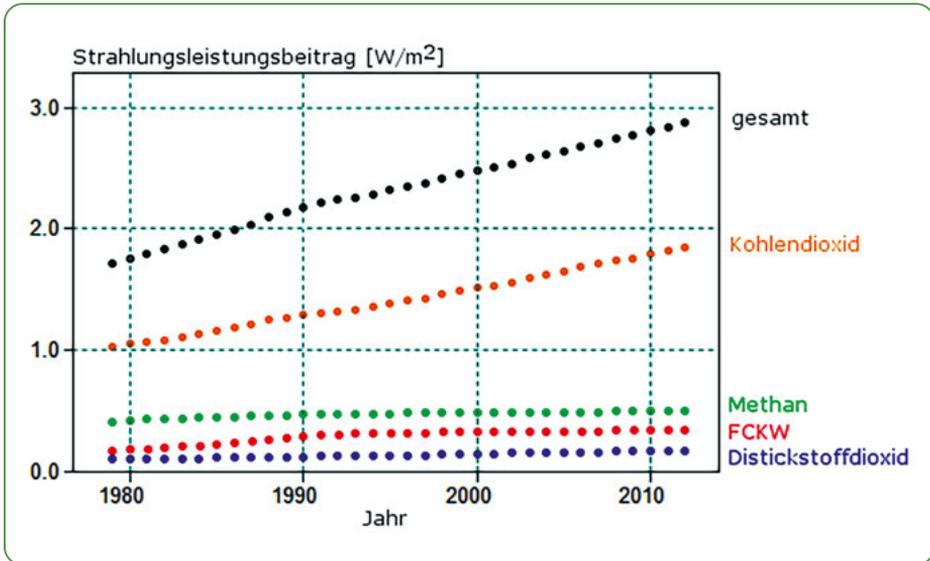
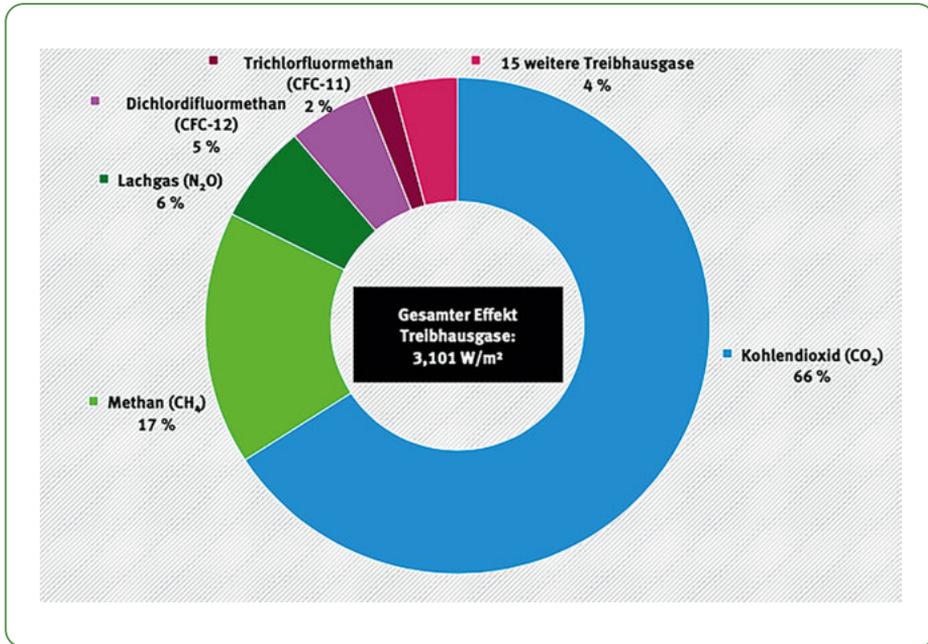


Abbildung 14: Strahlungsleistungsbeitrag in  $\text{W/m}^2$  verschiedener Treibhausgase  
 (Quelle: H. Lohinger: <http://anorganik.chemie.vias.org> / [http://anorganik.chemie.vias.org/img/treibhausgase\\_strahlungseintrag.png](http://anorganik.chemie.vias.org/img/treibhausgase_strahlungseintrag.png)).

Der natürliche Treibhauseffekt, infolgedessen die mittlere Erdtemperatur nicht bei  $-18^\circ\text{C}$  sondern bei etwa  $+15^\circ\text{C}$  liegt, ist vor allem durch Wasserdampf und  $\text{CO}_2$  verursacht, wobei Wasserdampf mehr als zwei Drittel der Temperaturerhöhung bewirkt. Das Treibhauspotenzial von Wasserdampf ist etwa 25-mal größer als das von  $\text{CO}_2$ . Wasserdampf wird nicht zu den anthropogenen, das heißt von Menschen verursachten Treibhausgasen gezählt, da seine Konzentration unabhängig von der unmittelbar in die Atmosphäre eingeleiteten Menge durch die Temperatur der Atmosphäre gegeben ist. Wenn die Sättigungskonzentration, die mit wachsender Temperatur zunimmt, erreicht ist, kondensiert der Wasserdampf zu Wolken und regnet ab.

Abbildung 14 zeigt, wie die durch verschiedene Treibhausgase verursachte Strahlungsleistung seit 1980 zugenommen hat [18]. Auf  $\text{CO}_2$  gehen etwa zwei Drittel des anthropogenen Treibhauseffekts zurück, auf  $\text{CH}_4$  17 %, auf Lachgas 6 %, auf die Chlorfluoromethane 7 % und auf weitere Treibhausgase 4 %. Selbst wenn  $\text{CO}_2$ , das auch aufgrund landwirtschaftlicher Aktivitäten emittiert wird, das wesentliche Treibhausgas ist, dürfen die anderen Treibhausgase nicht übersehen werden.

Der Mensch hat einen erheblichen Anteil an der aktuellen Klimaerwärmung



**Abbildung 15:** Der Beitrag langlebiger Treibhausgase zum Treibhauseffekt 2018  
 (Quelle: Umweltbundesamt / <https://elearning-meidling.vhs.at/mod/book/view.php?id=101608&chapterid=508>).

Abbildung 15 zeigt für das Jahr 2018 die Beiträge einzelner Klimagase zum Treibhauseffekt [19].

Zusammenfassend gibt es keinen vernünftig begründbaren Zweifel daran, dass der sehr starke Temperaturanstieg seit etwa 1970 (Abbildung 12) weitgehend durch die durch menschliche Aktivitäten verursachte Emission von Treibhausgasen in die Atmosphäre zurückgeht. Der natürliche Treibhauseffekt wird durch einen anthropogenen Treibhauseffekt verstärkt.

## Ausblick in die Zukunft

Neu an dem menschengemachten (anthropogenen) Treibhauseffekt ist, dass die Temperaturerhöhung nicht durch eine Änderung der von außen auf das »Treibhaus Erde« einfallenden kurzwelligeren Sonnenstrahlung (Abbildung 6) bewirkt wird, sondern durch die vorwiegend menschengemachte Änderung der Zusammensetzung der für den Treibhauseffekt wirksamen Atmosphäre, die zu einer Verminderung ihrer Durchlässigkeit für langwellige Strahlung führt.

Aus Abbildung 4 ist ersichtlich, dass die Sonneneinstrahlung während einer Warmzeit um etwa  $100 \text{ W/m}^2$  größer ist als während einer Kaltzeit. Die auf die Erdoberfläche treffende Sonneneinstrahlung ändert sich dadurch um ungefähr  $50 \text{ W/m}^2$  (Abbildung 6). Aus Abbildung 8 wird ersichtlich, dass diese Änderung der kurzwelligeren Einstrahlungsleistung unter dem natürlichen Treibhauseffekt zu einer Temperaturänderung von etwa  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  und einer Änderung der  $\text{CO}_2$ -Konzentration von etwa  $100 \text{ ppm}$  führt. Die Temperaturänderungen erfolgen mit einer Rate von etwa  $0,1 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ Jahre}$ . Die  $\text{CO}_2$ -Konzentrationsänderungen erfolgen mit einer Rate von etwa  $1 \text{ ppm}/100 \text{ Jahre}$ .

Wie aus Abbildung 12 ersichtlich, hat sich die Temperatur unter dem Einfluss des anthropogenen Treibhauseffekts von 1960 bis 2010 um etwa  $0,8 \text{ }^\circ\text{C}$  erhöht, das heißt mit einer Rate von  $1,6 \text{ }^\circ\text{C}$  in 100 Jahren. Die  $\text{CO}_2$ -Konzentration hat sich in diesem Zeitraum mit einer Rate von  $180 \text{ ppm}/100 \text{ Jahre}$  (Abbildung 10) vergrößert. Die Zahlen belegen, dass die derzeitige  $\text{CO}_2$ -Konzentrationsänderung mehr als 100-mal schneller erfolgt als in den vergangenen Jahrtausenden. Die  $\text{CO}_2$ -Konzentration hat inzwischen mit über  $400 \text{ ppm}$  einen Wert erreicht, der in den zurückliegenden  $400.000 \text{ Jahre}$  (Abbildung 8) niemals aufgetreten ist. Die derzeitige Temperaturänderungsgeschwindigkeit ist etwa 16-mal größer als in den zurückliegenden Jahrtausenden, sodass die Biosphäre nicht genügend Zeit hat, sich diesen Verhältnissen anzupassen. Der Homo sapiens lebte niemals unter atmosphärischen und klimatischen Verhältnissen, wie sie heute herrschen. Prognosen über zukünftige Entwicklungen des Klimas und der Lebensbedingungen auf der Erde sind daher außerordentlich schwierig.

Der Anstieg der durch die wachsenden Treibhausgaskonzentrationen verursachten Temperaturzunahme hängt aufgrund physikalischer Gesetzmäßigkeiten logarithmisch von der Konzentration ab, das heißt bei jeder Verdopplung der

Der Mensch hat einen erheblichen Anteil an der aktuellen Klimaerwärmung

Treibhausgaskonzentrationen sollte die Temperatur um etwa den gleichen Betrag steigen, sodass bei weiterer Zunahme der Treibhausgase mit einer Dämpfung der Temperaturzunahme zu rechnen ist. Die Temperatur steigt jedoch unvermindert steil an, ein Indiz dafür, dass Rückkopplungen wirksam sind. Solche Rückkopplungen können sich positiv oder negativ auswirken, das heißt den jeweiligen Trend verstärken oder dämpfen.

Eine positive Rückkopplung, die eine durch Zunahme der  $\text{CO}_2$ -Konzentration verursachte Erwärmung verstärkt, besteht beispielsweise darin, dass im Ozeanwasser gelöstes  $\text{CO}_2$  wegen der mit steigender Temperatur geringeren Löslichkeit in die Atmosphäre austritt, wodurch die  $\text{CO}_2$ -Konzentration in der Atmosphäre zunimmt und dadurch der Treibhauseffekt zusätzlich angetrieben wird. Der Temperaturengleich zwischen dem Wasser der Ozeane und der Luft der Atmosphäre dauert mehrere Jahre, sodass diese Rückkopplung und eine damit verbundene Temperaturerhöhung auch nach einem Stopp des anthropogenen  $\text{CO}_2$ -Eintrags in die Atmosphäre andauern würde. Eine weitere positive Rückkopplung besteht darin, dass infolge der Erwärmung Schnee und Eis von der Erdoberfläche abschmelzen, sodass die dadurch dunklere Erdoberfläche sich zusätzlich erwärmt, was wiederum zu einem zusätzlichen Schmelzen von Schnee und Eis führt usw. Eine weitere, mit einer Temperaturerhöhung verbundene positive Rückkopplung besteht darin, dass bei einem durch eine Erhöhung der Globaltemperatur bewirkten Auftauen der Permafrostböden Methan in die Atmosphäre abgegeben wird, was wiederum zu zusätzlicher Erwärmung führt. Die Verweilzeit von Methan in der Atmosphäre ist zwar wegen dessen chemischer Zersetzung erheblich kürzer als die von  $\text{CO}_2$ , es ist jedoch erheblich klimawirksamer als  $\text{CO}_2$ . Die vorgenannten positiven Rückkopplungen können zu Kipppunkten führen, bei deren Überschreiten die Temperatur in einem sich selbst verstärkenden Prozess ansteigt.

Für negative Rückkopplungen gibt es folgende Beispiele:

- ◆ Bei einer Erwärmung oder bei zunehmendem  $\text{CO}_2$ -Gehalt nimmt das Pflanzenwachstum zu. Dadurch wird vermehrt  $\text{CO}_2$  gebunden, sodass dessen Konzentration und die durch die Treibhauswirksamkeit ausgelöste Erwärmung vermindert werden.
- ◆ Der bei einer Erwärmung wachsende Wasserdampfgehalt der Atmosphäre führt zu zunehmender Wolkenbildung. Wolken schatten die Erde ab und bewirken eine Abkühlung.

- ◆ Bei Erwärmung und wachsender Feuchtigkeit nimmt die Verwitterung von Gesteinen zu, die durch die Bindung von  $\text{CO}_2$  aus der Atmosphäre bewirkt wird. Es kommt also zu einer Abnahme der  $\text{CO}_2$ -Konzentration und damit zu einer Verminderung der Treibhauswirkung.

Eine der zahlreichen weiteren komplexen Rückkopplungen besteht darin, dass ein Abschmelzen des auf Grönland lagernden Eises neben einem Anstieg des Meeresspiegels auch zu einer Erwärmung des Wassers im nördlichen Atlantik führt. Dadurch vermindert sich der Antrieb des Golfstroms, dem Teile von Europa ihr mildes Klima verdanken.

Vieles ist bisher in mathematischen Modellen kaum realitätsnah beschreibbar und erschwert langfristige Klimavorhersagen, wobei das Klima sich regional sehr verschieden entwickeln kann. Das gilt etwa für die sich infolge von Temperaturänderungen, Schmelzwasser und/oder Winden ändernden Strömungen des Wassers der Ozeane und der Luft der Atmosphäre, die Wechselwirkungen der Luft- und Wasserströmungen, die damit einhergehenden Wärmetransportvorgänge, die dadurch bedingten Konzentrationsänderungen der Wasserdampfkonzentration in der Atmosphäre sowie die dadurch hervorgerufenen Wolkenbildungen, die erhebliche Auswirkungen auf das Klima haben. Auch bei dem weitgehend konstanten  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Atmosphäre während der zurückliegenden 10.000 Jahre gab es Phasen mit unter und über den heutigen Temperaturen liegenden Werten. Darauf deuten etwa die unterschiedlichen Vergletscherungen der Alpen, die Funde ehemaliger Vegetationszonen, die von den sich zurückziehenden Gletschern freigegeben werden oder der Weinbau in England in früheren Warmzeiten hin. Bisherige Warmzeiten waren regelmäßig Zeiten wirtschaftlicher Blüte. Eine Extrapolation dieser zurückliegenden Verhältnisse in die Zukunft ist wegen der derzeit sehr raschen, durch menschliche Aktivitäten verursachten Zunahmen der Treibhausgase und der damit einhergehenden Zunahme der langwelligen Gegenstrahlung (Abbildung 6) und Erwärmung nicht möglich.

Eine Instabilisierung des Wettergeschehens, das wegen seines chaotischen Charakters noch schwerer vorausgesagt werden kann als die Entwicklung des Klimas, ist wegen der mit zunehmender Temperatur steigenden Energieumsetzungen zwischen dem Wasser und der Atmosphäre und den zunehmenden Energieumsetzungen innerhalb der Atmosphäre plausibel. Eine Vorhersage des Anstiegs der Wasserpegel ist schwierig, da neben dem Abschmelzen von auf dem Festland befindlichem Eis auch die Temperaturexpansion des Wassers eine Rolle spielt und

Der Mensch hat einen erheblichen Anteil an der aktuellen Klimaerwärmung

ein Anheben des von der Eislast befreiten Festlandes einem Anstieg des Meeresspiegels entgegenwirken würde. Es muss jedoch davon ausgegangen werden, dass das weitere Abschmelzen von Festlandeis, das weltweit in Hochgebirgsgletschern der Berge und in Grönland beobachtet wird, zu einem Anstieg des Meeresspiegels führt. Zu Warmzeiten lag der Meeresspiegel jeweils viele Meter über dem heutigen Niveau.

Auf der Pariser Weltklimakonferenz im Jahr 2015 wurde beschlossen, dass bis zum Jahr 2050 ein Gleichgewicht zwischen den Emissionen von  $\text{CO}_2$  in die Atmosphäre und der Absorption sowie Entnahme von  $\text{CO}_2$  aus der Atmosphäre erreicht werden soll. Dies soll etwa durch Pflanzen oder durch künstliche Einlagerung von  $\text{CO}_2$  in den Boden bewirkt werden. So soll gewährleistet werden, dass die  $\text{CO}_2$ -Konzentration in der Atmosphäre ab diesem Zeitpunkt nicht mehr zunimmt. Die Klimaerwärmung, die bereits deutlich über  $1^\circ\text{C}$  beträgt, soll dadurch auf weniger als  $2^\circ\text{C}$  – möglichst weniger als  $1,5^\circ\text{C}$  – gegenüber dem Ende des 19. Jahrhunderts begrenzt werden. Dazu ist es notwendig, dass der globale Ausstoß von durch die Verbrennung fossiler Energieträger entstehendem  $\text{CO}_2$ , der nach 2018 in die Atmosphäre gelangt, unter 420 Milliarden t liegt [20]. 2018 wurden 42 Milliarden t emittiert. Die jährlichen Emissionen steigen nach wie vor. Umgerechnet auf die Erdbevölkerung von knapp 8 Milliarden Menschen hat jeder Mensch im Jahresdurchschnitt ein Budget von gut 1,8 t. Doch selbst wenn diese extremen Beschränkungen realisiert werden, ist es keineswegs sicher, dass die Erderwärmung unterhalb von  $2^\circ\text{C}$  bleibt. Denn dies könnte durch die oben geschilderten Wechselwirkungen zwischen den zahlreichen, die Globaltemperatur beeinflussenden Parametern vereitelt werden. Die Prognosen der Klimawissenschaftler reichen von pessimistischen Annahmen, dass die Erwärmung kaum mehr aufzuhalten sei, bis zu optimistischen Aussagen, dass zumindest die menschengemachte Erwärmung noch zu bremsen sei. Die Pessimisten nehmen an, dass einzelne Kippunkte, bei denen sich selbst verstärkende Rückkoppelungen einsetzen und dann zum unaufhaltsamen Kippen eines alten Gleichgewichtszustandes in einen neuen Gleichgewichtszustand führen, bereits erreicht sind.

Die Weltbevölkerung ist von etwa 2 Milliarden in 1960 auf derzeit knapp 8 Milliarden Menschen angewachsen. Im gleichen Zeitraum ist der jährlich durch Verbrennung fossiler Energieträger entstehende  $\text{CO}_2$ -Ausstoß von knapp 10 Milliarden t auf knapp 40 Milliarden t angestiegen, die sehr ungleich auf die Weltbevölkerung verteilt sind [21]. Jeder der etwa 80 Millionen deutschen Bundesbürger erzeugt seit vielen Jahren durchschnittlich etwa 10 t  $\text{CO}_2$  mit leicht ab-

nehmender Tendenz. Für Frankreich, wo der Strom zum großen Teil von Kernkraftwerken erzeugt wird, sind es 6,6 t pro Jahr. Jeder der etwa 320 Millionen US-Amerikaner erzeugt jährlich etwa 17 t CO<sub>2</sub>. Jeder der etwa 1,4 Milliarden Chinesen erzeugte 1970 weniger als 0,5 t, 1995 etwa 2,5 t und 2015 etwa 7,5 t CO<sub>2</sub>. Dies ist ein Zeichen für das massive Wirtschaftswachstum in China, dessen gesamter jährlicher CO<sub>2</sub>-Ausstoß inzwischen über dem der USA liegt. Jeder der etwa 1,35 Milliarden Inder erzeugt dagegen jährlich nur etwa 1,4 t CO<sub>2</sub>. Die vorgenannten Zahlen betreffen die auf die Einwohner des jeweiligen Landes bezogenen und dort erzeugten CO<sub>2</sub>-Emissionen. Wenn man die »konsumierten« CO<sub>2</sub>-Emissionen berücksichtigt, das heißt dem jeweiligen Land diejenigen Emissionen zurechnet, die infolge der dort eingesetzten oder verbrauchten Produkte und erbrachten Dienstleistungen entstanden sind, verschieben sich die Zahlen größtenteils weiter zuungunsten der Industrieländer. China beispielsweise ist so etwas wie die »Werkstatt« der Welt. Daher ist ein Großteil der dort hergestellten Produkte und damit ein Großteil der CO<sub>2</sub>-Emissionen eigentlich den Ländern zuzurechnen, in welche die Produkte exportiert werden, womit sie zum Lebensstandard der dortigen Bevölkerung beitragen.

Wie sich aus diesen Betrachtungen ergibt, geht die Zunahme der CO<sub>2</sub>-Konzentration maßgeblich darauf zurück, dass die Bewohner der industrialisierten Staaten, die weniger als ein Drittel der Erdbevölkerung bilden, die für ihren Wohlstand und ihren Lebensstil erforderlichen Ressourcen ohne Rücksicht auf Nachhaltigkeit verbraucht haben. Auch wenn es nicht zum Thema dieses Buches gehört, sei noch darauf hingewiesen, dass der ökologische Fußabdruck [22] – also die Erdoberfläche, die jeder Einwohner für die Aufrechterhaltung seiner augenblicklichen Lebensweise benötigt – im Jahr 2013 für jeden der etwa 1 Milliarde Einwohner der Hocheinkommensländer ungefähr 6,4 ha betrug, obwohl die in diesen Ländern verfügbare Biokapazität nur bei 3,7 ha lag. Jeder Bürger der EU Länder benötigte 4,7 ha, hatte aber nur 2,1 ha zur Verfügung. Würden alle Erdenbürger den Standard der USA von 9,4 ha beanspruchen, so wären dafür fast vier Erden notwendig. In Zukunft ist es daher nicht damit getan, lediglich die Energieversorgung auf weitgehend regenerative Energieträger umzustellen; die Summe der ökologischen Fußabdrücke der Bewohner der einzelnen Länder darf die Erde nicht überbeanspruchen. Die Unterschiede zwischen den ökologischen Fußabdrücken müssen vermindert werden; andernfalls werden die weltweiten Migrationsbewegungen weiter zunehmen. Jede auf Wachstum in den reichen Industrieländern gerichtete Politik, die eine weitere Zunahme des ökologischen Fußabdrucks in Kauf nimmt

Der Mensch hat einen erheblichen Anteil an der aktuellen Klimaerwärmung

und nicht darauf gerichtet ist, die ökologischen Fußabdrücke der Erdbewohner aneinander anzugleichen, muss als unverantwortlich bezeichnet werden.

In der absehbaren Zukunft wird die beobachtete Erwärmung der Erdoberfläche aufgrund der positiven Rückkopplungen auch bei einem sofortigen drastischen Rückgang der anthropogenen Treibhausgasemissionen voraussichtlich weiter zunehmen. Ob ein Rückgang der anthropogenen Treibhausgasemissionen, wie auf der Pariser Klimakonferenz vereinbart, tatsächlich erreicht wird, ist angesichts des riesigen Nachholbedarfes der bevölkerungsreichen Schwellen- und Entwicklungsländer für ein menschengerechtes Leben ohne Not, der Prognosen zum weltweiten Energiebedarf und zum weiteren Absatz der fossilen Energieträger sowie dem ungebrochenen Streben der Industrieländer nach weiterem Wachstum sehr fraglich. Die Menschheit ist daher gut beraten, sich auf stärkere Änderungen des Klimas und des Wetters einzustellen als bisher beobachtet. Maßnahmen zur Vermeidung von dadurch bewirkten Schäden sind daher genauso dringlich wie eine drastische Verminderung der Emissionen von Treibhausgasen. Eile ist geboten, weil jede zusätzliche Emission die Klimaänderungen weiter verstärkt, sodass die Kosten für die Schadensbeseitigung und die Vermeidung künftiger Schäden weiter steigen. Die Industrienationen haben als Hauptverursacher des bisherigen Klimawandels eine besondere Verantwortung. Dies betrifft die Senkung der Treibhausgasemissionen, den Ersatz der durch den Klimawandel eintretenden Schäden und die unabdingbaren Vorsorgemaßnahmen zur Minderung der infolge des Klimawandels künftig zu erwartenden Schäden. Dabei müssen sie ihre eigenen Treibhausgasemissionen senken und können nicht durch die Finanzierung von emissionsmindernden Maßnahmen in anderen Ländern erreichbare Minderungen gegenrechnen. Von den Industriestaaten finanzierte, in Drittländern durchgeführte Maßnahmen zur Emissionsminderung von Treibhausgasen können jedoch ein sinnvolles Mittel zur Schaffung von Wohlstand in diesen Staaten sein, wodurch ein wirtschaftlich bedingter Migrationsdruck gemindert werden kann.

Das Gebot der Nachhaltigkeit, das heißt die Aufgabe, die Erde nachfolgenden Generationen in einem Zustand zu überlassen, dass die nachfolgenden Generationen sie ähnlich wie wir nutzen können, verpflichtet nicht nur zu einer drastischen Einschränkung der Emissionen klimawirksamer Gase, sondern auch zu einem sparsamen Umgang mit fossilen Energieträgern und ganz allgemein mit den Ressourcen der Erde. Leitlinie muss sein, die Ressourcen nicht zu verbrauchen, sondern sie – ähnlich wie die Natur das tut – in einem Kreislauf integriert zu gebrauchen. Das ist bei der Verbrennung der in Millionen von Jahren in der

Erde entstandenen fossilen Energieträgern nicht der Fall. Die Abkehr von einer auf der Verbrennung fossiler Energiequellen beruhenden Energieversorgung ist daher bei allen Unwägbarkeiten über den tatsächlichen Nutzen für das zukünftige Klima eine notwendige Maßnahme, um die Nachhaltigkeit unseres Handelns zu verbessern. Die Emission von CO<sub>2</sub> infolge der Verbrennung fossiler Energieträger ist der größte Treiber des Treibhauseffekts. Gleichwohl darf nicht übersehen werden, dass die Land- und Forstwirtschaft durch Emissionen von CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O sowie durch den CO<sub>2</sub>-Ausstoß und verminderte CO<sub>2</sub>-Speicherung infolge von Waldrodungen und veränderter Bodennutzung etwa 24 % des anthropogenen Treibhauseffekts verursachen, sodass auch hier ein grundsätzlicher Wandel erforderlich ist.

Bevor ich auf Einzelheiten eines Umstiegs der bundesdeutschen Wirtschaft von einer auf fossilen Energieträgern basierenden Energieerzeugung zu einer nachhaltigen, das heißt CO<sub>2</sub>-emissionsfreien bzw. klimaneutralen Energieerzeugung eingehe, möchte ich die Gründe für unseren bedenkenlosen Umgang mit den Ressourcen der Erde erläutern. Eine Änderung dieses bedenkenlosen Umgangs wird dadurch erschwert, dass wir uns über Generationen daran gewöhnt haben und inzwischen überzeugt sind, ein notfalls auch mit militärischen Mitteln durchsetzbares Recht auf den Zugang zu den von uns für notwendig erachteten Ressourcen zu haben.

Die negativen Folgen der Erderwärmung und der menschenverursachte Anteil daran sind offensichtlich. Wie konnte es dazu kommen? Unter anderem hat ein historisch gewachsenes Freiheitsverständnis zu einem bedenkenlosen Verbrauch fossiler Energieträger und zur Entsorgung riesiger Mengen des Treibhausgases CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre geführt.

Nur ein Umstieg auf erneuerbare Energiequellen kann die Klimakrise begrenzen. Windkraft und Solarenergie müssen weiter ausgebaut werden, ihre Potenziale sind in Deutschland jedoch begrenzt – und die Volatilität von Wind und Sonnenschein erfordert neue Energiespeicher, wie etwa Wasserstoff. Wasserstoffnutzung und synthetische Kraftstoffe sind für spezielle mobile Anwendungen nötig. Auch die Steuerung der Energieversorgung wird wichtiger und komplexer.

All das wird nicht ausreichen: Es braucht zusätzlich eine Abkehr vom ständigen Wirtschaftswachstum, und die Energiewende muss auch international erfolgreich sein. Für Deutschland kann es ein Vorteil sein, dass die Exportchancen zukunftssicherer (Energie-)Technologien Wettbewerbsnachteile, die aufgrund höherer Stromkosten entstehen, überkompensieren.

**Heiko Barske** ist promovierter Physiker. Nach unterschiedlichen Positionen im VW-Konzern, etwa als Leiter von Forschung und Entwicklung mit Vorstellung von Elektro- und Hybridautos bereits in den 1990er-Jahren, war er freiberuflich als Patentanwalt tätig. Er beschäftigt sich mit politischen Rahmenbedingungen für eine nachhaltigere Wirtschaft.