

Treibhauseffekt

aus Wikipedia, der freien Enzyklopädie

Durch die Wirkung des **Treibhauseffektes** ist die Oberflächentemperatur eines Planeten höher als die Temperatur wäre, wenn keine strahlungsaktiven Gase (Treibhausgase einschließlich Wasserdampf) in der Atmosphäre vorhanden wären. Wegen der Ähnlichkeit der Wirkungsweise wurde der Begriffsumfang, der ursprünglich nur die Erwärmung im Gewächshaus bei Sonnenbestrahlung benannte, auf die Atmosphäre erweitert.

In diesem Sinne ist der Treibhauseffekt 1824 von Joseph Fourier entdeckt und 1896 erstmals quantitativ von Svante Arrhenius genauer beziffert worden. Die systematische Erforschung des *atmosphärischen Treibhauseffekts* begann aber erst 1958 durch Charles D. Keeling, einen Studenten Roger Revelles. Durch Keeling wurden eine Vielzahl von Messstationen für Kohlendioxid aufgebaut, die bekannteste ist auf dem Berg Mauna Loa auf Hawaii.

Der durch menschliche Eingriffe entstandene Anteil am atmosphärischen Treibhauseffekt wird anthropogener Treibhauseffekt genannt.

Inhaltsverzeichnis

- 1 Physikalische Grundlagen
 - 1.1 Kompakte Darstellung des Mechanismus
 - 1.2 Ausführliche Darstellung
- 2 Glashauseffekt
 - 2.1 Selektive Transparenz
 - 2.2 Nutzung
- 3 Atmosphärischer Treibhauseffekt
 - 3.1 Treibhausgase
 - 3.2 Regelmechanismus der Erde
- 4 Anthropogener Treibhauseffekt
- 5 Die Rolle der Wolken
- 6 Einfluss der Vegetation und des Bodens
- 7 Treibhauseffekt und Ozonloch
- 8 Literatur
- 9 Weblinks
- 10 Quellen

Physikalische Grundlagen

Vergleiche mit den Daten anderer Planeten und (relativ) einfache Berechnungen zeigen, dass es nicht nur hier auf der Erde einen Treibhauseffekt gibt. Aus dem Rückstrahlvermögen der Erde kann man die Gleichgewichtstemperatur berechnen, die bestehen würde, wenn es *keine* Atmosphäre gäbe: sie würde diesem Fall im Mittel -18 °C betragen (siehe auch Beispiele für Strahlungsaustausch). Das ist deutlich weniger als der durch Messungen und Interpolation bestimmte Wert von $+14\text{ °C}$.

[1] Der Unterschied ist beim Nachbarplaneten Venus viel gewaltiger: Statt der berechneten 141 °C wurde tatsächlich etwa 440 °C gemessen. In beiden Fällen gibt es eine Ursache: Den Treibhauseffekt. Diskutiert wird jedoch, welchen Einfluss die Veränderung der Zusammensetzung der Atmosphäre durch Treibhausgase zukünftig haben wird.

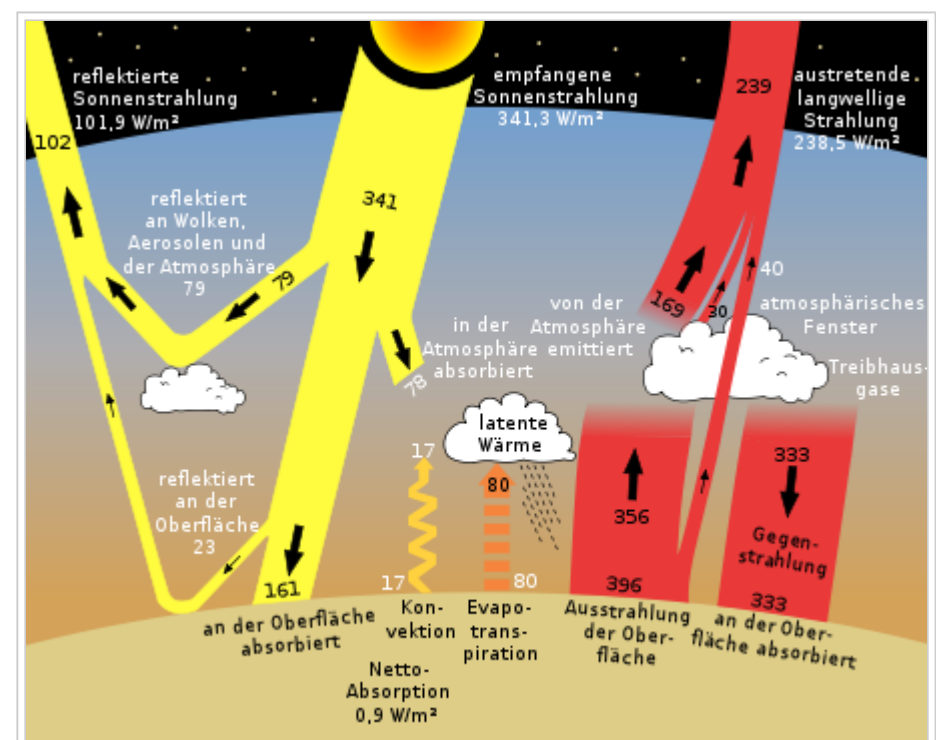
Kompakte Darstellung des Mechanismus

Der Treibhauseffekt kann in folgenden Schritten erklärt werden:

1. Die Sonne strahlt sehr viel Energie in Form von elektromagnetischen Wellen zur Erde. Dadurch wird die Oberfläche der Sonne gekühlt (Strahlungskühlung).
2. Die häufigsten Photonenwellenlängen des Sonnenlichtes liegen um 500 nm , das entspricht grünem Licht. Aus diesem Strahlungsmaximum kann man auf die Oberflächentemperatur der Sonne rückschließen: etwa 5600 °C oder 5900 K .
3. In diesem Spektralbereich (sichtbares Licht) absorbieren die Lufthülle der Erde so wie auch die Glasscheiben eines Treibhauses nur wenig Strahlung - man spricht von hoher Transparenz. Die Strahlung kann also fast ungehindert *in* das Treibhaus.
4. Die Gegenstände im Treibhaus absorbieren die Photonen und erwärmen sich dadurch auf etwa 30 °C oder 300 K .
5. Die erwärmten Gegenstände strahlen ebenfalls elektromagnetische Wellen ab, deren häufigste Wellenlängen aber bei 10000 nm liegen (Infrarotstrahlung). Der Grund für diese Vergrößerung der Wellenlänge heißt Wiensches Verschiebungsgesetz: Wenn die (absolute) Temperatur auf $1/20$ sinkt, steigt die Wellenlänge, bei der die größte Strahlungsintensität auftritt, auf das 20-fache.
6. Für diese "Rückstrahlung" sind aber Glas und bestimmte Elemente in der Lufthülle der Erde undurchlässig. Die Strahlung wird teilweise absorbiert. Gleichzeitig können die Treibhausgase Wärmestrahlung weit besser abgeben als Stickstoff und Sauerstoff. Sie strahlen die durch Absorption und Konvektion erhaltene Wärmeenergie gleichmäßig in alle Richtungen, also auch zum Boden hin, ab. Der Boden erhält so zusätzliche Wärmestrahlung („Atmosphärische Gegenstrahlung“).

Ausführliche Darstellung

Wenn Strahlung durch Materie geht, wird sie von der Materie teilweise absorbiert und teilweise durchgelassen. Die Stärke von Absorption und Durchlässigkeit hängt von der Wellenlänge (im sichtbaren Bereich = Farbe) der Strahlung ab. Der Treibhauseffekt tritt auf, wenn die Durchlässigkeits- und Absorptionskoeffizienten der Begrenzungen eines Volumens wellenlängenabhängig sind. Dabei tritt die äußere Strahlung relativ ungehindert in das Volumen ein und wird ergänzt durch Strahlung, die von der Begrenzung ausgeht. Eng verbunden mit der von der Begrenzung ausgehenden Strahlung ist, dass die innere Strahlung von der Begrenzung des Volumens weitgehend absorbiert wird (Kirchhoffsche Gesetze). Dabei wird ein wesentlicher Teil der inneren Strahlung im eingeschlossenen Volumen von den Begrenzungen absorbiert (hauptsächlich) oder reflektiert. Dabei spielt die Reflexion beim *atmosphärischen Treibhauseffekt* keine Rolle und auch beim *Glashaus* ist die Bedeutung der Reflexion sehr gering, weil im relevanten Wellenlängenbereich die Glasscheiben fast als schwarze Körper wirken. Zu dieser inneren Strahlung kommt eine weitere Strahlung (hauptsächlich von der Sonne), die einen Teil der Begrenzung (Glasscheiben beziehungsweise die Schicht der Treibhausgase) wegen der anderen Wellenlänge fast mühelos durchdringt (**selektive Transparenz**) und von einem anderen Teil der Begrenzungsfläche (beispielsweise Erdboden) absorbiert wird. Durch die Summe der beiden Strahlungen (innere Strahlung eines Hohlraums, die von **allen** Begrenzungsflächen ausgeht, plus der durchgelassenen Strahlung) werden die getroffenen Stellen stärker erwärmt als ohne Scheibe oder Treibhausgas.



Kurzwellige Strahlung der Sonne trifft auf die Atmosphäre und Erdoberfläche. Langwellige Strahlung wird von der Erdoberfläche abgestrahlt und in der Atmosphäre fast vollständig absorbiert. Im thermischen Gleichgewicht wird die absorbierte Energie der Atmosphäre je zur Hälfte in Richtung Erde und Weltall abgestrahlt. Die Zahlen geben die Leistung der Strahlung in Watt/Quadratmeter für den Zeitraum 2000-2004 an.

Glashauseffekt

Als Glashauseffekt (abgeleitet aus dem Französischen von *effet de serre*, wie er zuerst von Joseph Fourier genannt wurde) wird der Treibhauseffekt dann bezeichnet, wenn in einem Innenraum durch verglaste Fensteröffnungen oder Dächer Sonnenlicht einfällt und von den Materialien des Innenraums absorbiert wird. Dadurch kann sich der Innenraum deutlich über das Niveau der Umgebungstemperatur aufheizen. Von den aufgeheizten Wandflächen erwärmt sich über Wärmeleitung und Konvektion die Luft im Innenraum. Da bei einem geschlossenen Glashaus nur wenig erwärmte Luft durch kalte Außenluft ersetzt wird, ist der Kühlungseffekt durch kalte Außenluft nicht groß. Zuweilen wird der Glashauseffekt nach den großen, architektonisch stilvollen Gewächshäusern von Botanischen Gärten und Schlossparks – den Orangerien – auch **Orangerieeffekt** genannt.

Selektive Transparenz

Fensterglas ist transparent für sichtbares Licht und kurzwelliges Infrarot, wie es von der Sonne abgestrahlt wird. Für langwelliges Infrarot (den Bereich der Wärmestrahlung bei den Glashaustemperaturen) ist es fast undurchlässig. Diese Wellenlängenabhängigkeit der Transparenz ist entscheidend für die Glashauswirkung (dass das Fensterglas auch für UV-Licht fast undurchlässig ist, spielt in diesem Zusammenhang keine Rolle). Das durch verglaste Fensteröffnungen oder Dächer eindringende Sonnenlicht wird von den Materialien des Innenraumes absorbiert und heizt diese auf. Diesen Effekt kennt man von Fahrzeugen, die im Sommer lange in der Sonne gestanden haben. Die Materialien im Inneren eines Gewächshauses, z. B. der Boden, werden durch die eintreffende Sonnenstrahlung erwärmt und heizen wiederum über Wärmeleitung und insbesondere Konvektion die umgebende Luft des Innenraums. Da das Gewächshaus wegen der selektiven Transparenz strahlungsmäßig rundum weitgehend geschlossen ist, kann die Wärme strahlungsmäßig den Innenraum nicht verlassen, und er heizt sich auf, d. h. im Gewächshaus steigt die Temperatur in Relation zur Umgebung. Wird auch eine Lüftung unterbunden, so entfällt jegliche Wärmeabfuhr durch konvektiven oder turbulenten Wärmeaustausch der inneren mit der äußeren Luftmasse, wie sie ohne mechanische Absperrung uneingeschränkt und mit Lüftung eingeschränkt von statten gehen würde. Nun wird die Temperatur im Innenraum weitgehend durch das Strahlungsgleichgewicht bestimmt. Je nach Güte der Wärmeisolierung spielen auch die Verluste durch Wärmeleitung (z.B. Einscheibenglas oder Isolierglas) eine mehr oder weniger große Rolle. Bei der Gleichgewichtstemperatur ist die Leistungszufuhr durch die Solarstrahlung mit der Leistungsabfuhr durch die (in der Regel) geringe Abstrahlung und die (in der Regel) geringe Wärmeleitung ausgeglichen, so dass diese Gleichgewichtstemperatur meistens sehr deutlich über der Umgebungstemperatur liegt.

Die gesteuerte Lüftung über Dachluken wird in Gewächshäusern verwendet, um insbesondere tagsüber in heißen Sommermonaten überschüssige Wärmeenergie nicht durch Strahlung, sondern durch Luftmassenaustausch abzuleiten und somit im Inneren ein verträgliches Temperaturniveau (unter 40 °C) zu halten. Nachts kann es hingegen auch im Sommer recht kühl werden. Ursache sind Verluste durch Wärmeleitung (gering), Luftmassenaustausch durch Lüftung (größer, wenn möglich), besonders jedoch die Rückstrahlung in den Weltraum (besonders bei sternklarem Himmel), der die gesamte Erdkruste nachts unterliegt und die vom Glashaus nur sehr marginal behindert wird. Es ist nicht zu empfehlen, es sich im Winter nachts im Glashaus gemütlich machen zu wollen, auch wenn tagsüber schön die Sonne schien. Hält man bei Nacht jedoch die Luken geschlossen, wird der Wärmeverlust gedämpft, die sinusförmige Welle der Tagestemperatur flacher und man bewirkt somit ein ausgeglicheneres und relativ warmes Mikroklima im Gewächshaus.

Nutzung

Der Effekt wird seit langem in Unterglaskulturen/Treibhäusern genutzt. Außer in Gewächshäusern wird der Glashauseffekt auch als passive Sonnennutzung in der Architektur gezielt eingesetzt, um Brennstoff zum Heizen von Wohnräumen zu sparen. Dies wird durch eine Südausrichtung der großen Glasfronten und/oder Wintergärten des Gebäudes erreicht, über die die Luft des Hauses erwärmt wird. Insbesondere so genannte Niedrigenergiehäuser und Passivhäuser nutzen diesen Effekt zur drastischen Reduktion des Einsatzes einer zusätzlichen Heizung. Besonders intensiv lässt sich dieses Phänomen in einem in der Sonne geparkten Auto beobachten/erfühlen.

Auch Sonnenkollektoren nutzen diesen Effekt. Hier kann die selektive Transparenz des Glases mit selektiver Absorption des Kollektors ergänzt werden, um dessen Wärmeabstrahlung zu verringern. Bei Vakuumkollektoren wird auch die Konvektion zwischen Glas und Kollektor unterbunden.

Atmosphärischer Treibhauseffekt

Treibhausgase

siehe auch Artikel Treibhausgase

In der Erdatmosphäre bewirken Treibhausgase wie Wasserdampf, Kohlenstoffdioxid, Methan und Ozon seit Bestehen der Erde einen Treibhauseffekt, der entscheidenden Einfluss auf die Klimageschichte der Vergangenheit und das heutige Klima hat. Die Rolle des Glases wird hier von den genannten Treibhausgasen übernommen, die durchgängig für den kurzwelligen Anteil der Sonnenstrahlung sind, langwellige Wärmestrahlung hingegen je nach Treibhausgas in unterschiedlichen Wellenlängen absorbieren und emittieren.

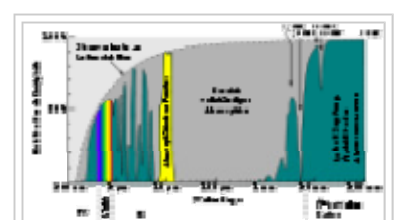
Der größte Teil des Treibhauseffekts wird mit einem Anteil von ca. 36-70 % (ohne Berücksichtigung der Effekte der Wolken) durch Wasserdampf in der Atmosphäre verursacht. Kohlendioxid trägt ca. 9-26 % zum Treibhauseffekt bei, Methan ca. 4-9 %, und Ozon ca. 3-7 %. Der Ozongehalt spielt insbesondere in der Stratosphäre eine sehr wichtige Rolle für das Klima. Es wird vom Menschen nicht direkt sondern indirekt über fluorierte Treibhausgase beeinflusst. Im Kyoto-Protokoll sind deshalb auch wasserstoffhaltige (HFC bzw. H-FKW), perfluorierte Fluorkohlenwasserstoffe (PFC bzw. FKW) und Schwefelhexafluorid (SF₆) in die Liste der Treibhausgase aufgenommen worden.

Ein exakter %-Anteil der Treibhausgase auf den Treibhauseffekt kann nicht angegeben werden, da der Einfluss der einzelnen Gase je nach Breitengrad und Vermischung variiert (die jeweils höheren Prozentwerte geben den ungefähren Anteil des Gases selbst an, die niedrigeren Werte ergeben sich aus den Mischungen der Gase).^[2]

Angetrieben werden die Wärmevorgänge an der Erdoberfläche und in der Atmosphäre von der Sonne. Die Stärke der Solarstrahlung in der Erdbahn wird als Solarkonstante bezeichnet und hat etwa einen Wert von 1367 W/m², der je nach Erdentfernung und Sonnenaktivität zwischen 1325 W/m² und 1420 W/m² schwankt.

Bei Vorgängen mit einer geringen Wärmespeicherung (z. B. die innere Erwärmung eines Autos in der Sonne) ist von diesem Wert (1367 W/m²) auszugehen, denn nachts ohne Sonneneinstrahlung kühlt sich das Autoinnere schnell ab und nimmt etwa die Umgebungstemperatur an. Bei der großen Masse der Erde spielt die Wärmespeicherung eine erhebliche Rolle, was man z. B. daran sieht, dass der Sommer als wärmste Zeit nicht um die Zeit des Sonnenhöchststandes ist (etwa 22. Juni), sondern es erst danach wärmer wird und deswegen der Sonnenhöchststand als Sommerbeginn genommen wird. Wegen dieser großen Speicherwirkung wird bei den Energiebilanzen in der Atmosphäre immer mit dem Mittelwert über die ganze Erdoberfläche gerechnet: Die Erde erhält Solarstrahlung auf der Fläche des Erdquerschnitts (πR^2) und hat eine Oberfläche von ($4 \pi R^2$). Diese beiden Flächen haben ein Verhältnis von 1:4. Als Mittelwert für die ganze Erdoberfläche ist deswegen die Solarkonstante durch 4 zu teilen, so dass im Mittel eine Strahlung von 342 W/m² auf die Erdoberfläche fällt.

Von der Sonnenenergie, die die Erde erreicht, wird durch Wolken, Luft und Boden (vor allem Eis und Schnee, siehe Albedo) ein Anteil von etwa 30 % wieder in den Weltraum reflektiert - das sind etwa 103 W/m². Die restlichen



Durchlässigkeit der Atmosphäre für elektromagnetische Strahlung unterschiedlicher Wellenlängen. Der gelbe Bereich heißt Atmosphärisches Fenster; dort ist die Atmosphäre durchlässig für elektromagnetische Wellen des Infrarot-Bereiches.

70 % werden absorbiert - das sind etwa 239 W/m^2 . Wäre das die einzige Strahlung, die vom Erdboden absorbiert würde, so würde die Erdoberfläche im Mittel eine Temperatur von etwa $-18 \text{ }^\circ\text{C}$ annehmen, denn ein schwarzer Körper, der eine Leistung von 239 W/m^2 abstrahlt, hat eine Temperatur von $-18 \text{ }^\circ\text{C}$ (Plancksches Strahlungsgesetz). Aber es gibt eine weitere Bestrahlung durch die aufgeheizten Treibhausgase mit etwa 150 W/m^2 , die so genannte atmosphärische Gegenstrahlung. Damit absorbiert die Erdoberfläche insgesamt 389 W/m^2 - und die werden bei der tatsächlichen mittleren Erdoberflächentemperatur von $+15 \text{ }^\circ\text{C}$ auf mehreren Wegen abgegeben. Ein Teil davon wird durch Strahlung abgegeben, das wird wieder durch das Plancksche Strahlungsgesetz beschrieben. Die Energieabgabe geschieht aber auch durch weitere Vorgänge wie z.B. die Konvektion. Die Erdoberflächentemperatur ist zugleich die bodennahe Lufttemperatur.

Die von der Erdoberfläche abgestrahlte Energie hat eine andere Spektral-(Farb)verteilung, als das einfallende Sonnenlicht, das eine Spektralverteilung entsprechend einer Farbtemperatur von etwa 6000 K hat und von den atmosphärischen Gasen kaum absorbiert wird. Die Spektralverteilung der von der Erdoberfläche abgestrahlten Energie wird durch die $+15 \text{ }^\circ\text{C}$ der Erdoberfläche bestimmt, so dass nur etwa 90 W/m^2 direkt von der Erdoberfläche in den Weltraum gestrahlt werden. Die restlichen 299 W/m^2 werden teilweise durch Strahlung an die für diesen Wellenlängenanteil undurchsichtige Atmosphäre (verursacht durch die Treibhausgase) durch Absorption abgegeben, teilweise auch durch andere Vorgänge, z.B. Konvektion. Dadurch wird die Atmosphäre aufgeheizt. Die Atmosphäre hat zwei Oberflächen: eine zum Weltraum hin und eine zur Erde hin. Da die Temperatur in der Atmosphäre sich mit der Höhe ändert, muss die Abstrahlung aus den Treibhausgasen nicht in beide Richtungen mit gleicher Stärke erfolgen. Zur Zeit ist es so, dass die Abstrahlung aus der Atmosphäre auf jeder Seite etwa gleich groß ist. So wird die absorbierte Energie von 299 W/m^2 auf jeder Seite zur Hälfte - also 150 W/m^2 abgestrahlt. (Anmerkung: Ein schwarzer Körper mit einer Abstrahlung von 150 W/m^2 hat etwa eine Temperatur von $-40 \text{ }^\circ\text{C}$.)

Durch die Abstrahlung in den Weltraum von der Atmosphäre mit 150 W/m^2 , den direkten 90 W/m^2 von der Erdoberfläche und dem Albedo-Anteil von 103 W/m^2 ist das etwa gleich der mittleren Einstrahlung von 342 W/m^2 , d. h. Einstrahlung ist etwa gleich Ausstrahlung. Das zeigt sich auch in der Tatsache, dass sich die Temperatur der Erde nur langsam ändert - woraus zwingend folgt, dass die Erde die absorbierte Sonnenenergie wieder abgibt - aber wegen der niedrigen Erdtemperatur wird die Energie hauptsächlich als langwellige Infrarotstrahlung emittiert (Wiensches Verschiebungsgesetz).

Der Wärmestrom aus dem Erdinneren spielt praktisch keine Rolle (etwa $0,06 \text{ Watt/m}^2$). Aus dem Weltenergieverbrauch (im Jahr 2004) in Höhe von 432 Exajoule und der Größe der Erdoberfläche von rund 510 Millionen km^2 errechnet sich ein auf die Nutzung nicht regenerativer Energieträger zurückzuführender Wärmestrom (Leistung) in Höhe von rund $0,026 \text{ Watt pro Quadratmeter}$.^[3]

Probleme haben manche mit der Energie, die die Treibhausgase in Richtung Erdoberfläche abstrahlen (150 W/m^2 - wie schon oben genannt), da diese Energie von einem kühleren Körper (etwa $-40 \text{ }^\circ\text{C}$) zu dem wärmeren Körper (Erdoberfläche etwa $+15 \text{ }^\circ\text{C}$) strömt und dieses angeblich dem II. Hauptsatz der Thermodynamik widerspreche. Das ist aber eine falsche Interpretation, denn er lässt die Solareinstrahlung (von sogar 6000 K) unberücksichtigt, in der Bilanz ist wieder der II. Hauptsatz erfüllt (siehe auch Strahlungsaustausch).

Zusammengefasst ergibt sich: Die Rückstrahlung aus der Atmosphäre zur Erde führt zur zusätzlichen Erwärmung der Erdoberfläche um $33 \text{ }^\circ\text{C}$. Damit liegt die durchschnittliche globale Temperatur bei $15 \text{ }^\circ\text{C}$ statt bei $-18 \text{ }^\circ\text{C}$.

Atmosphäre	% Restanteil Treibhauseffekt
wie bisher	100
ohne H_2O , CO_2 , O_3	50
ohne H_2O	64
ohne Wolken	86
ohne CO_2	88
ohne O_3	97
ohne alle Treibhausgase	0
Quelle: Ramanathan and Coakley (1978), Rev. Geophys and Space Phys., 16 465; siehe auch bei RealClimate.org.	

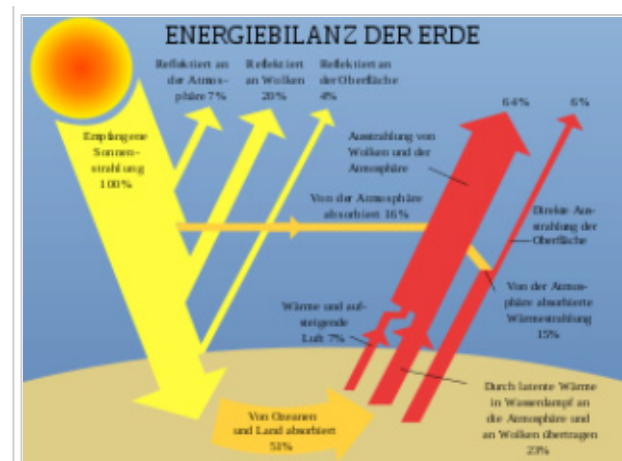
Wichtig ist auch die Höhenverteilung, von wo die Wärmestrahlung die Erdoberfläche erreicht. Für den Treibhauseffekt direkt bedeutsam ist nur der Anteil der Abstrahlung aus niedrigen Höhen, weil nur diese Abstrahlung den Erdboden erreicht, ohne vorher von den Treibhausgasen wieder absorbiert zu werden (siehe nächster Absatz). Dabei ist das "niedrig" sehr wellenlängenabhängig, denn die Länge, nach der die Strahlung wieder absorbiert wird (Absorptionslänge) ist wellenlängen- und konzentrationsabhängig. Ist die Absorptionslänge größer als die Atmosphärendicke, so ist die Atmosphäre bei diesen Wellenlängen fast durchsichtig. Da die Stärke einer Strahlung von der Temperatur der Quelle abhängig ist, steigt die Strahlstärke, wenn die Absorptionslänge kürzer wird: wegen der Temperaturabnahme mit der Höhe steigt die mittlere Temperatur über der kürzeren Absorptionslänge. Damit kann die atmosphärische Gegenstrahlung in einem Wellenlängenbereich bei zunehmenden Treibhausgasemengen auch dann noch stärker werden, wenn die Atmosphäre in diesem Wellenlängenbereich bereits so gut wie undurchsichtig ist.

Der Temperaturverlauf bis zu einer Höhe von ca. 11 km ist dabei praktisch nur adiabatisch bedingt, die durch die Abstrahlung der Treibhausgase verlorengelende Energie wird durch Konvektion und Strahlungsabsorption ersetzt. Dabei kommt die absorbierte Strahlung von verschiedenen Quellen:

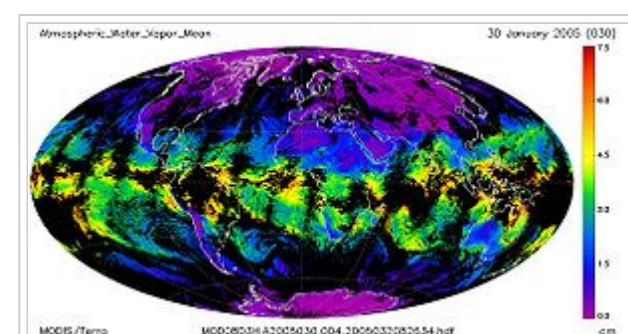
- Solarstrahlung (sehr geringer Anteil)
- Abstrahlung von der Erdoberfläche
- Abstrahlung aus tieferliegenden Schichten
- Abstrahlung aus höherliegenden Schichten

Der Anteil an dem Aussenden von langwelliger Wärmestrahlung durch Treibhausgase wie

- Kohlenstoffdioxid (CO_2),
- Methan (CH_4),
- Lachgas (N_2O)



Der Energiehaushalt der Erde wird nicht nur durch Treibhausgase, sondern auch durch die Wolken beeinflusst.



Verteilung des Wasserdampfs in der Erdatmosphäre. Der kondensierbare Wasserdampf einer Luftsäule über einer Grundfläche von 1 m^2 wird in cm angegeben

und anderen Gasen wird *trockener Treibhauseffekt* genannt. Die Einbeziehung von Wasserdampf führt zum *feuchten Treibhauseffekt*. Etwa 62 % des Treibhauseffekts werden durch Wasserdampf verursacht, etwa 22 % durch Kohlendioxid.

Interessant ist der Temperaturverlauf als Funktion der Druckhöhe (an der Erdoberfläche ist der höchste Druck 1,013 bar). Nach oben nimmt der Druck ab, weil die Gasmasse geringer wird. Gleichen Druckänderungen entsprechen gleiche Anzahl von Gasteilchen. In der Troposphäre wird der Temperaturverlauf am Besten durch eine Adiabate mit dem Exponenten 0,19 beschrieben. Oberhalb der Troposphäre ist die Gasmasse gering und es liegt kein adiabatischer Verlauf mehr vor. Die Spitze der Realatmosphäre bei niedrigen Drücken wird durch die UV-Absorption des Sauerstoffs (Ozon-Bildung und -Zerfall) verursacht. Durch die Krümmung der Kurve in der Troposphäre ist auch die Existenz der Troposphäre erklärlich: Wäre die Kurve eine Gerade, so wäre im Mittel die von den Treibhausgasen absorbierte Energie gleich der emittierten Energie - wegen der Krümmung und ihrer Art ist aber die emittierte Energie größer als die absorbierte Energie, die Luft wird also gekühlt und sinkt nach unten. Dadurch wird eine Vertikalzirkulation in Gang gesetzt, die nach den Gasgesetzen mit konstantem Wärmeinhalt (der Strahlungsverlust ist klein zum Wärmeinhalt) zum adiabatischen Verlauf führt.

Regelmechanismus der Erde

Auch erdgeschichtlich war der Treibhauseffekt von entscheidender Bedeutung. So ist die Leuchtkraft der Sonne seit ihrer Entstehung vor 4,6 Milliarden Jahren um über 30 % angestiegen. Gleichzeitig hat die Konzentration der Treibhausgase - insbesondere von Kohlendioxid und Methan - über einen selbstregulierenden Mechanismus in diesem Zeitraum stark abgenommen. Erhöhte Temperatur bewirkte verstärkte Verwitterung der Erdoberfläche und Ausfällung von Kohlendioxid im Meer in Form von Kalk. Dadurch nahm der Kohlendioxidgehalt ab, wodurch die Temperatur sank und Verwitterung und Ausfällung abnahmen und sich die Temperatur in der Folge wieder auf dem alten Wert bei einem niedrigeren Kohlendioxidgehalt in der Atmosphäre einpendelte. *Siehe auch:* Paradoxon der schwachen jungen Sonne.

In der Frühzeit des Lebens auf der Erde wurden von Archaeen große Mengen des für den Treibhauseffekt hochwirksamen Gases Methan produziert, welches zusätzlich zum Kohlendioxid entscheidend dazu beitrug, dass es auf der Erde damals trotz erheblich niedriger Sonneneinstrahlung gemäßigt warm war. Als jedoch Cyanobakterien und Algen aufkamen und als Abfallprodukt der Photosynthese Sauerstoff produzierten, wurde das Methan in der Atmosphäre nun zu den weniger klimawirksamen Gasen Kohlendioxid und Wasserdampf oxidiert. Zusätzlich wurde weniger Methan produziert, weil Sauerstoff für das damalige Leben hochgiftig war und die Archaeen dadurch abgetötet wurden. Deswegen kam es mehrmals in der Erdgeschichte - jedes Mal wenn die Sauerstoffkonzentration sprunghaft zunahm, zuletzt vor etwas mehr als 500 Millionen Jahren - zu einem globalen Temperatursturz, bei dem die Ozeane der Erde komplett zufroren und somit die heute vom Weltall aus *blaue Erde*, die damals aufgrund des Methangehalts in der Atmosphäre vom Weltall aus betrachtet eine *orange Erde* war, zu einem *weißen Schneeball* wurde. Aufgrund der starken Reflexion des Eises und somit nur geringen Erwärmung des Bodens und der Luft war die Erde nun in einer Art „Kältefalle“ gefangen und das Leben kam fast zum Erliegen.

Die Vulkane stießen jedoch nach wie vor Treibhausgase wie Kohlendioxid aus, welche sich nun aufgrund der nicht mehr stattfindenden Verwitterung und Ausfällung im Meer in der Atmosphäre anreicherten. Der Kohlendioxidgehalt stieg dadurch in einem Zeitraum von ca. 10 Millionen Jahren auf extrem hohe Werte solange an bis der Treibhauseffekt stark genug war das Eis zu schmelzen. Infolgedessen absorbierte die nun wieder freigelegte Erdoberfläche wesentlich mehr Sonnenlicht und es folgten einige 10'000 Jahre mit einem globalen Saunaklima. Aufgrund der nun starken Verwitterung und Ausfällung wurde der Kohlendioxidgehalt stark reduziert und gewaltige Kalkablagerungen innerhalb kürzester Zeit abgelagert, was schlussendlich wieder wie vorher zu einem gemäßigten Klima führte, jedoch mit deutlich reduziertem Methangehalt der Atmosphäre.

Letztendlich sind also zwei abiotische Klimaregulatoren dafür verantwortlich, dass sich das Klima in erdgeschichtlichen Zeiträumen immer wieder trotz veränderter Strahlungsleistung der Sonne und durch das Leben selbst veränderter Umweltbedingungen bei gemäßigten Temperaturen eingependelt hat: Der Vulkanismus und die Plattentektonik als Recycler der Kalkablagerungen und somit als Kohlendioxidproduzenten und die Verwitterung und Ausfällung als Kohlendioxidsenke. Würde bspw. der Vulkanismus aufhören und keine Plattentektonik existieren, wie auf dem Mars, würde dieser Mechanismus nicht mehr funktionieren und das Erdklima sich abkühlen und Leben in der bisherigen Art wäre auf der Erde nicht mehr möglich.

In ca. 500 bis 800 Millionen Jahren (je nach Modellrechnung), also lange bevor die Sonne zu einem Roten Riesen wird (was erst in ca. 4 Milliarden Jahren der Fall sein wird), wird aufgrund der zunehmenden Sonnenleistung die Kohlendioxidkonzentration so weit sinken, dass die Photosynthese in der heutigen Form nicht mehr möglich ist. Leben in der bisherigen Form wird dann wahrscheinlich nicht mehr möglich sein.

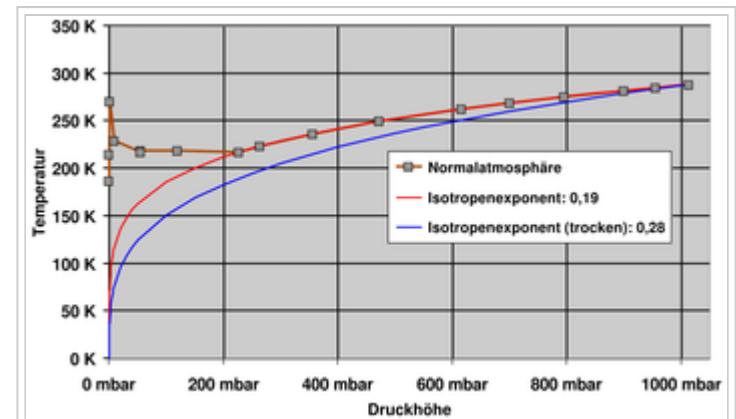
Die Bedeutung des globalen Treibhauseffektes kann man somit auch an den extrem unterschiedlichen Oberflächentemperaturen der Planeten Venus, Erde und Mars erkennen. Diese Temperaturunterschiede hängen nicht nur von der Entfernung zur Sonne ab, sondern vor allem von den (aufgrund verschiedener Ursachen) unterschiedlichen Atmosphären.

Anthropogener Treibhauseffekt

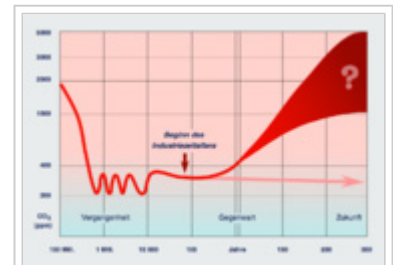
Hauptartikel: Globale Erwärmung

Im Gegensatz zum auf geologischen Zeitskalen ablaufenden natürlichen atmosphärischen Treibhauseffekt mit seinen Regulationsmechanismen läuft der anthropogene Treibhauseffekt in extrem kurzer Zeit ab. Die Erhöhung der Konzentration der Treibhausgase in den letzten 100 Jahren (CO₂ um etwa 35 %, Methan um ca. 150 % durch Reisanbau, Rinderzucht und Müllfäulnis) führte zu einer Erhöhung der globalen Durchschnittstemperatur um ca. 0,8 K in den letzten 100 Jahren. Damit hat der Mensch einen Anteil von 2 % am *gesamten* Treibhauseffekt von 33 °C.

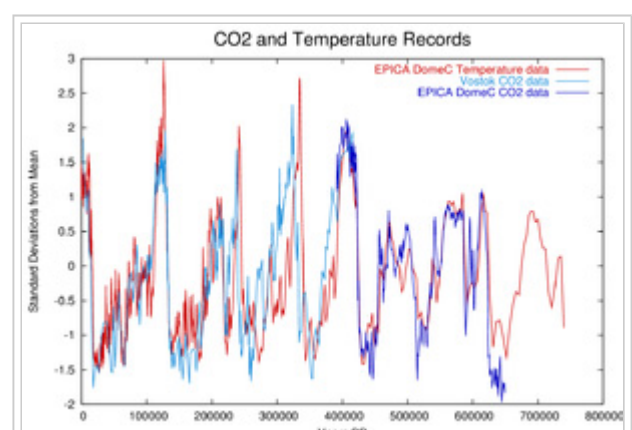
Aus der Analyse von Bohrungen im antarktischen Eis durch das Europäische Projekt für Eiskernbohrung in der Antarktis und Bohrungen im Wostok-Eiskern geht hervor, dass die globale Kohlenstoffdioxidkonzentration mindestens während der letzten 750.000 Jahre nie 290 ppm (parts per million, Teile pro Million) überschritten hat. Während der Eiszeiten war sie mit 180 ppm niedriger als während der Warmzeiten. Mit Beginn der Industrialisierung stieg die Konzentration exponentiell an. Der rote Kurvenabschnitt ergibt sich aus kontinuierlichen Messungen der Messstation Mauna Loa auf Hawaii seit 1958. Im Jahre 2002 betrug der Mittelwert bereits 375 ppm, die jährliche Zuwachsrate 1,5 ppm. Gegenwärtig erreicht der Mittelwert 381 ppm.



Temperaturverlauf der Atmosphäre als Funktion der Druckhöhe (Erdoberfläche = 1,013 bar) - die Tropopause wird am Besten mit einem Isotrophenexponenten von 0,19 angenähert.



CO₂-Konzentration der Atmosphäre schematisch dargestellt für die letzten 100 Millionen Jahre mit einer Prognose für die nächsten 300 Jahre



Korrelation von CO₂-Konzentration und Temperatur über die letzten 750.000 Jahre, aus Eisbohrkernen rekonstruiert

Die jahreszeitlichen Schwankungen spiegeln die Vegetationsperiode der Nordhalbkugel wieder: Von April bis September wird durch die Photosynthese CO_2 verbraucht. Von Oktober bis März, wenn die Photosyntheserate stark herabgesetzt ist, steigt der CO_2 -Gehalt aufgrund der jetzt überwiegenden Zellatmung und anthropogener Verbrennungsprozesse an.

Die Amplitude des Jahresganges hängt vom Standort der Mess-Station ab:

- Zugspitze (2650 m): 11,4 ppm. Hier liegt die Mess-Station oberhalb der Vegetationszone.
- Schauinsland (1200 m): 14,0 ppm. diese Mess-Station wird stärker von anthropogenen CO_2 -Quellen beeinflusst.
- Hawaii: 5,9 ppm.

Von der klaren Mehrheit der Wissenschaftler wird die Hypothese vertreten, die vom Menschen verursachte Zunahme der Treibhausgase in der Atmosphäre, der so genannte *anthropogene Treibhauseffekt*, werde in den nächsten Jahrzehnten und Jahrhunderten eine weitere globale Erwärmung und damit einen Klimawandel bewirken, beziehungsweise dass dieser schon eingetreten ist und sich weiter auswirken wird. Begründet wird der anthropogene Treibhauseffekt mit dem Anstieg der Treibhausgase auf das Doppelte des vorindustriellen Niveaus, wie es auch im IPCC-Bericht angegeben ist. Die Empfindlichkeit des Klimas auf CO_2 -Änderungen wird als Klimasensitivität bezeichnet. Diese Klimasensitivität liegt bei den verschiedenen globalen Klimamodellen bei 1,5 °C bis 4,5 °C, wobei die meisten Modelle ein Erwärmung um ca. 3 °C bei einer Verdoppelung des CO_2 -Gehalts berechnen. Die Ergebnisse der Klimamodelle zeigen auch die Zunahme von Wetterextremen, den Anstieg des Meeresspiegels und Veränderungen an der Eisbedeckung der Erde (siehe Folgen der globalen Erwärmung). Da viele der in den Modellen prognostizierten Ereignisse gleichzeitig auch beobachtet werden können, dienen diese Erscheinungen als zusätzliche Belege für den anthropogenen Treibhauseffekt.

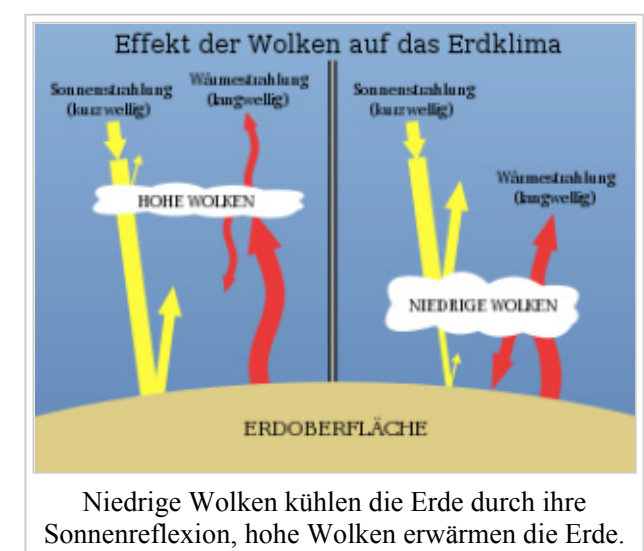
Der anthropogene Treibhauseffekt ist nicht zu verwechseln mit der ebenfalls vom Menschen verursachten Schädigung der stratosphärischen Ozonschicht, die zum so genannten Ozonloch führt.

Die Rolle der Wolken

Wolken beeinflussen das Klima der Erde maßgeblich neben den Treibhausgasen Wasserdampf, Kohlenstoffdioxid, Methan und Ozon. Wolken reflektieren dabei einen Teil der einfallenden Sonnenenergie, die Helligkeit der Wolken stammt dabei von der reflektierten kurzwelliger Energie. Wenn die Optische Dicke niedriger Wolken größer wird, und somit mehr Energie zurückgestrahlt wird, sinkt die Temperatur der Erde und umgekehrt.

Hohe Wolken sind oft dünn und nicht sehr reflektierend. Sie lassen einen Großteil der Sonnenwärme durch, und da sie sehr hoch liegen, wo die Lufttemperatur sehr niedrig ist, strahlen diese Wolken nicht viel Wärme ab. Die Tendenz hoher Wolken ist, die Erde zu erwärmen. Niedrige Wolken sind oft dicht und reflektieren viel Sonnenlicht zurück in den Weltraum. Sie liegen dabei auch niedriger in der Atmosphäre, wo Temperaturen wärmer sind, und strahlen deshalb mehr Wärme ab. Die Tendenz niedriger Wolken ist, die Erde zu kühlen.

Die Vegetation und die Beschaffenheit des Bodens und insbesondere seine Versiegelung, Entwaldung oder Landwirtschaftliche Nutzung haben maßgeblichen Einfluss auf die Verdunstung und somit auf die Wolkenbildung und das Klima.^[4]



Einfluss der Vegetation und des Bodens

Die Vegetation und die Bodenbeschaffenheit selbst haben neben der Wolkenbildung noch weitere Bedeutung für das Klima der Erde. Zum anderen reflektieren sie je nach Beschaffenheit das einfallende Sonnenlicht unterschiedlich. Reflektiertes Sonnenlicht wird als kurzwellige Sonnenstrahlung in den Weltraum zurückgeworfen (ansonsten wäre die Erdoberfläche aus Sicht des Weltalls ohne Infrarotkamera schwarz).

Albedo ist ein Maß für das Rückstrahlvermögen von diffus reflektierenden (reemittierenden), also nicht spiegelnden und nicht selbst leuchtenden Oberflächen.

Oberflächen	Albedo in %
Siedlungen	15–20
Tropischer Regenwald	10–12
Laubwald	15–12
Kulturflächen	15–30
Grünland	12–30
Ackerboden	15–30
Sandboden	15–40
Dünensand	30–60
Gletschereis	30–75
Asphalt	15
Wolken	60–90
Wasser	5–22

Man kann anhand der Albedo voraussagen, dass ein Abschmelzen der Polkappen die Erde zusätzlich erwärmen würde.

Des Weiteren führt nicht nur der Verbrauch von fossilen Energieträgern zu einer Freisetzung von Treibhausgasen in die Atmosphäre. Die intensive Bestellung von Ackerland und die Entwaldung sind ebenfalls eine bedeutende Treibhausgasquelle. Die Vegetation benötigt für den Prozess der Photosynthese Kohlendioxid zum Wachsen. Bäume benötigen CO_2 in weit größeren Mengen, als einfaches Getreide. Der Boden ist eine wichtige Senke, da er eine Menge an organischem Material beinhaltet, das Kohlenstoff enthält, das beim Ackerbau teilweise freigesetzt wird.^[5]

Treibhauseffekt und Ozonloch

In der öffentlichen Diskussion wird der Treibhauseffekt gelegentlich in Zusammenhang mit dem Ozonloch, also der Schwächung der Ozonschicht, gebracht. Tatsächlich handelt es sich aber um zwei unterschiedliche Effekte. Sowohl die Auslöser als auch die Gegenmaßnahmen können unabhängig voneinander betrachtet werden.

Es gibt Modellrechnungen, nach denen ein verstärkter Treibhauseffekt einen verstärkten Ozonabbau zur Folge haben kann.^[6]

Sowohl Ozon als auch die ozonabbauenden Fluorchlorkohlenwasserstoffe sind Treibhausgase, aufgrund ihrer geringen Menge aber von geringer Bedeutung.




Literatur

- C.-D. Schönwiese: *Der anthropogene Treibhauseffekt in Konkurrenz zu natürlichen Klimaänderungen*. Geowissenschaften 13(5/6), S. 207 ff. (1995), ISSN 0933-0704

Weblinks

 **Wiktionary: Treibhauseffekt** – Bedeutungserklärungen, Wortherkunft, Synonyme, Übersetzungen und Grammatik

 **Commons: Treibhauseffekt** – Sammlung von Bildern, Videos und Audiodateien

- Website des IPCC und dessen Vierter Sachstandsbericht (englisch)
- Klima-FAQ des Max-Planck-Instituts für Meteorologie
- populäre Darstellung des Treibhauseffekts
- Bad Meteorology: The Greenhouse Effect, räumt mit populären Vorstellungen des „Treibhauses“ auf (englisch)
- Stellungnahme der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft zu den Grundlagen des Treibhauseffektes (PDF-Datei) (43 kB)
- Temperatur-Treibhauseffekt gut dargestellt ab Seite 7 (PDF-Datei; 1,13 MB)
- Animation des ZDF zum Treibhauseffekt

Quellen

1. ↑ P.D. Jones, M. New, D. E. Parker, S. Martin, and I. G. Rigor: SURFACE AIR TEMPERATURE AND ITS CHANGES OVER THE PAST 150 YEARS, *Reviews of Geophysics*, 37, 2/ May 1999 pages 173–199 Online, PDF
2. ↑ Kiehl, J. T. und Kevin Trenberth (1997): *Earth’s Annual Global Mean Energy Budget*, in: *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol 78, Issue 2, S. 197-208, Februar (PDF)
3. ↑ Nakicenovic N., A. Grübler, A. McDonald (1998): *Global Energy Perspectives*, Cambridge University Press, New York
4. ↑ NASA Facts (1999): *Clouds and the Energy Cycle*
5. ↑ ESPERE-ENC: *Der Beitrag der Landwirtschaft zu den Treibhausgasen*
6. ↑ Was hat das Ozonloch mit dem Treibhauseffekt zu tun? vom Max-Planck-Institut für Meteorologie

Von „<http://de.wikipedia.org/wiki/Treibhauseffekt>“

Kategorien: [Klimatologie](#) | [Atmosphäre](#) | [Strahlung](#) | [Umwelt- und Naturschutz](#) | [Nachhaltigkeit](#)

- Diese Seite wurde zuletzt am 9. August 2009 um 19:40 Uhr geändert.
- Der Text ist unter der Lizenz „Creative Commons Attribution/Share Alike“ verfügbar; zusätzliche Bedingungen können anwendbar sein. Siehe die Nutzungsbedingungen für Einzelheiten.
Wikipedia® ist eine eingetragene Marke der Wikimedia Foundation Inc.

