

Unverkäufliche Leseprobe aus:

Mojib Latif
Klima

Alle Rechte vorbehalten. Die Verwendung von Text und Bildern, auch auszugsweise, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlags urheberrechtswidrig und strafbar. Dies gilt insbesondere für die Vervielfältigung, Übersetzung oder die Verwendung in elektronischen Systemen.

© S. Fischer Verlag GmbH, Frankfurt am Main

KLIMA

GRUNDRISS

Wissenschaftliche Grundlagen	3
Was ist der Unterschied zwischen Wetter und Klima?	3
Die Zusammensetzung der Atmosphäre	5
Der natürliche Treibhauseffekt	9
Der anthropogene Treibhauseffekt	13
Die globale Kohlenstoffbilanz	16
Warum schwankt das Klima?	21
Die Eiszeitzyklen	23
Vorhersagbarkeit des Klimas	26
Das Klima des 20. und 21. Jahrhunderts	29
Das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)	29
Was kann man heute schon an Veränderungen sehen?	30
Wer ist schuld an den Veränderungen?	33
Was bringt die Zukunft?	37
Wie wird das Klima in Europa in der Mitte des 21. Jahrhunderts aussehen?	41
Wie stark steigt der Meeresspiegel?	46
Was will das Kioto-Protokoll?	51

VERTIEFUNGEN

Einfluss von Vulkanen	55
Klimamodelle	60
Das Lorenz-Modell	62
Die Trägheit des Klimas	68
Der Fingerabdruck des Menschen	69
Wie entstehen Wolken und Niederschlag?	74

Was ist das El Niño-Phänomen?	78
Was ist der Golfstrom und wie verhält er sich in der Zukunft?	81
Meereis	85
Inlandeis	89
Vegetation	93
Die Nordatlantische Oszillation (NAO)	96
Welche Rolle spielen Kondensstreifen für unser Klima?	105
Die Ozonproblematik	108

ANHANG

Glossar	116
Literaturhinweise	127

WISSENSCHAFTLICHE GRUNDLAGEN

Was ist der Unterschied zwischen Wetter und Klima?

Als Klimaforscher wird man oft gefragt, wie das Wetter am folgenden Tag werden wird. Der Laie unterscheidet offenbar nicht zwischen Wetter und Klima. Die Wetterforschung befasst sich mit der Entstehung, Verlagerung und der Vorhersage einzelner Wetterelemente, etwa eines bestimmten Tiefdruckgebietes oder eines Hurrikans, während die Klimaforschung an der Gesamtheit der Tiefs und Hurrikane interessiert ist und sich beispielsweise der Frage widmet, wie viele Tiefs oder Hurrikane es nächstes Jahr geben wird oder ob sie sich infolge der globalen Erwärmung intensivieren werden. Die Weltorganisation für Meteorologie (WMO) definiert das Klima als die Statistik des Wetters über einen Zeitraum, der lang genug ist, um diese statistischen Eigenschaften auch bestimmen zu können. Während das Wetter den physikalischen Zustand der Atmosphäre zu einem bestimmten Zeitpunkt an einem bestimmten Ort beschreibt, ist Klima erst dann vollständig beschrieben, wenn auch die Wahrscheinlichkeit für Abweichungen vom Mittelwert angegeben werden kann, also auch die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von extremen Wetterereignissen, wie beispielsweise der Elbflut des Jahres 2002 oder der Dürre in Deutschland im Jahr darauf. Zur Beschreibung des Klimas wird in der Regel eine Zeitspanne von 30 Jahren als Bezugszeitraum herangezogen.

Der Begriff »Klima« ist von *klinein*, dem griechischen Wort für »neigen«, abgeleitet, denn Sommer und Winter sind Folge der Neigung der Erdachse relativ zur Bahnebene der Erde um die Sonne, der so genannten Ekliptik. Gegenwärtig beträgt die Neigung 23,5 Grad, wo-

S. 74

durch während des Nordsommers die Nordhalbkugel und während des Südsommers die Südhalbkugel stärker von der Sonne bestrahlt wird. Die übliche geographische Einteilung in Klimazonen folgt überwiegend dem daraus resultierenden Jahresgang meteorologischer Größen wie etwa der Temperatur und des **Niederschlags**. Die Neigung der Erdachse wie auch andere Erdbahnparameter schwanken im Laufe der Jahrtausende und sind mit dafür verantwortlich, dass es in der Erdgeschichte immer wieder starke Klimaumschwünge gegeben hat.

Die im Jahresgang und im Mittel unterschiedliche Einstrahlung der Sonne am Äquator und am Pol sorgt für starke räumliche Unterschiede in der Oberflächentemperatur der Erde. Die daraus resultierenden horizontalen Temperaturunterschiede in der unteren Atmosphäre führen zu Luftdruckunterschieden. Unter dem Einfluss der Schwerkraft und der Rotation der Erde entstehen schließlich die Winde. Die mittleren dreidimensionalen Windverhältnisse bezeichnet man als »allgemeine Zirkulation« der Atmosphäre. Die Atmosphäre ist aber kein isoliertes System, sondern steht mit anderen Komponenten des Erdsystems in Wechselwirkung, der Hydrosphäre (Ozeane und Wasserkreislauf auf Kontinenten und in der Atmosphäre), der Kryosphäre (Eis und Schnee), der Biosphäre (Tiere und Pflanzen), der Pedosphäre (Boden) und der Lithosphäre (Gestein). Diese Bestandteile definieren das Klimasystem (siehe Abbildung 1) und sie bewegen sich mit völlig unterschiedlichen Geschwindigkeiten und haben drastisch unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten und Wärmekapazitäten. Die Dynamik des Klimasystems und die daraus folgende Statistik des Klimas wird daher durch die stark unterschiedlichen Zeitskalen der individuellen Komponenten geprägt. Die untere Atmosphäre passt sich in Stunden den Bedingungen an der Oberfläche an, die Tiefenzirkulation der Ozeane reagiert erst in Jahrhunderten voll auf eine veränderte Zusammensetzung der Atmosphäre, und ein großes **Inlandsgebiet** wie die Antarktis braucht dazu viele

S. 89

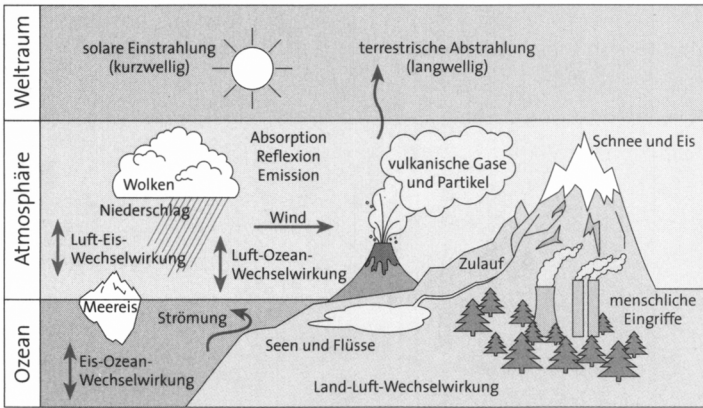


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Klimasystems der Erde

Jahrtausende. Klimaveränderungen können einerseits aus Wechselwirkungen zwischen den individuellen Komponenten, beispielsweise zwischen Ozean und Atmosphäre, resultieren oder extern ange regt werden, beispielsweise durch eine Veränderung der solaren Einstrahlung, durch oder durch eine Veränderung der Zusammensetzung der Erdatmosphäre. In den letzten hundert Jahren gewinnt aber auch der Mensch immer mehr Bedeutung für das Klima, indem er klimarelevante Spurengase in die Atmosphäre emittiert, dadurch die Strahlungsbilanz der Atmosphäre verändert und so zu einer globalen Erwärmung der Erde beiträgt.

S. 55

Die Zusammensetzung der Atmosphäre

Die optimalen Lebensbedingungen auf der Erde verdanken wir u. a. der chemischen Zusammensetzung der Erdatmosphäre, die sich von der anderer Planeten im Sonnensystem deutlich unterscheidet. Die Hauptbestandteile der Erdatmosphäre sind Stickstoff (N_2) mit 78% und Sauerstoff (O_2) mit 21%, die zusammen also einen Anteil von

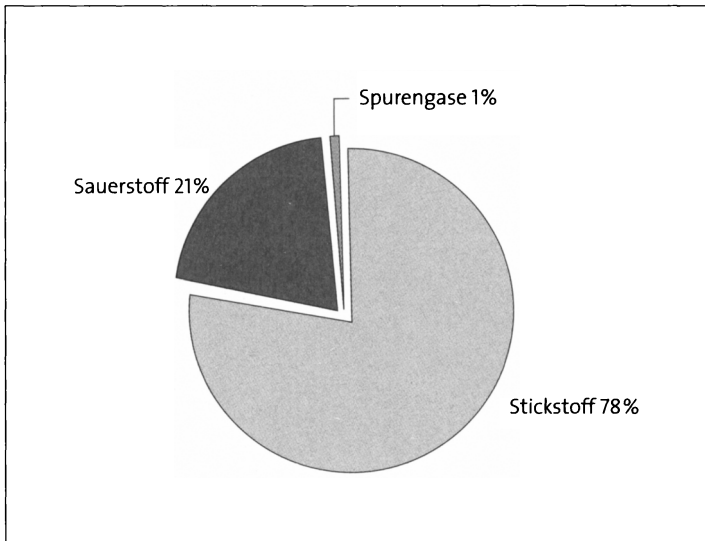


Abbildung 2: Die Zusammensetzung der Atmosphäre

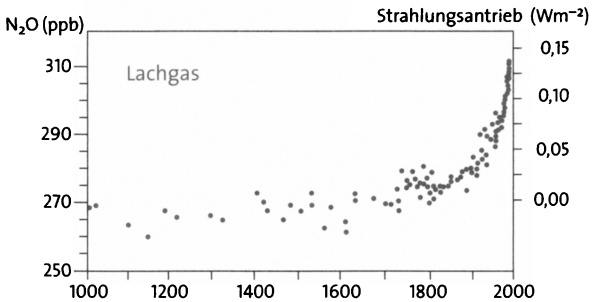
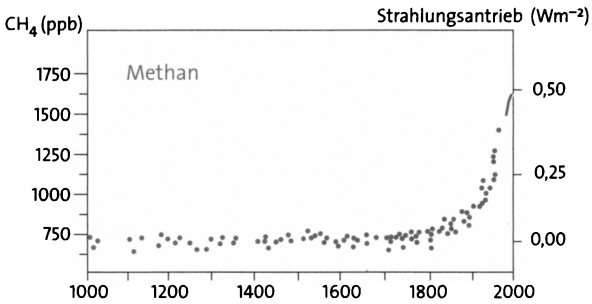
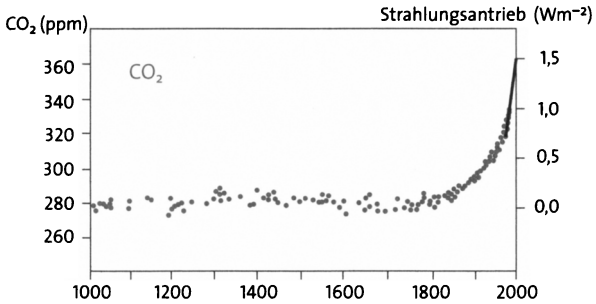
etwa 99% haben. Unser lebensfreundliches Klima auf der Erde haben wir aber einigen wenigen anderen Gasen zu verdanken, die zwar nur in winzigen Spuren vorkommen (daher der Name Spurengase), jedoch einen starken Einfluss auf das Klima der Erde ausüben, indem sie den Strahlungshaushalt der Erde beeinflussen. Hierzu zählen vor allem der Wasserdampf (H_2O), das Kohlendioxid (CO_2) und **Ozon** (O_3). So hat beispielsweise das Kohlendioxid z. Zt. nur einen Anteil von etwa 0.037% (370 ppm, ppm = parts per million), es ist aber für unser derzeitiges und künftiges Klima von großer Bedeutung.

S. 108

Abbildung 3: Zeitliche Entwicklungen der drei Spurengase Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4) und Distickstoffoxid (Lachgas, N_2O) in den letzten 1000 Jahren. Ebenfalls angegeben sind die entsprechenden Strahlungsantriebe. Man erkennt deutlich den Anstieg der Konzentrationen seit Beginn der Industrialisierung (nach IPCC 2001a).

Indikatoren menschlichen Einflusses auf die Atmosphäre seit Beginn der Industrialisierung

Globale Konzentration in der Atmosphäre von drei gut durchmischten Treibhausgasen



Messungen belegen zweifelsfrei, dass der Mensch durch seine vielfältigen Aktivitäten die Zusammensetzung der Atmosphäre verändert und dabei insbesondere die Konzentration der langlebigen klimarelevanten Spurengase erhöht (Abbildung 3, Tabelle 1). Dies ist der Kern des Klimaproblems. So stieg die Konzentration von Kohlendioxid (CO_2) um etwa 30%, die des Methans (CH_4) um ca. 150% und die des Distickstoffoxids (Lachgas, N_2O) um etwa 17% gegenüber ihren vorindustriellen Werten an. Die Gründe sind vielfältig. Sie liegen im starken Anstieg der Verbrennung fossiler Energieträger ebenso wie in der Ausweitung der industriellen Produktion, in Änderungen bei der Landnutzung oder bei der Ausweitung der Viehwirtschaft. Zum Teil gelangen völlig neue Stoffe wie die Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) in die Atmosphäre, die in der Natur praktisch nicht vorkommen, sondern ausschließlich durch den Menschen erzeugt werden.

Alle diese Stoffe und Gase, zu denen auch Wasserdampf und Ozon gehören, haben eine besondere Eigenschaft. Sie lassen die von der Sonne (vor allem im sichtbaren, kurzwelligen Bereich) auf die Erde einfallende, energiereiche Strahlung nahezu ungehindert passieren, absorbieren teilweise aber die im Gegenzug von der erwärmten Erde ausgehende langwellige Strahlung. Dies ist, vereinfacht gesagt, die Natur des »Treibhauseffekts«. Die dabei beteiligten Gase werden allgemein als »Treibhausgase« bezeichnet.

Die vom Menschen in die Atmosphäre emittierten Treibhausgase haben relativ lange Lebensdauern. Beim Kohlendioxid schwankt die Lebensdauer stark in Abhängigkeit vom betrachteten Entfernungsprozess, sie beträgt im Mittel aber etwa hundert Jahre. Darüber hinaus schwanken die Raten der Konzentrationsänderungen auch innerhalb bestimmter Grenzen, die in der Tabelle angegebenen Zahlen sind daher als Mittelwerte über die 1990er zu verstehen. Die Spurengase verteilen sich wegen ihrer langen Lebensdauer über den Erdball und sind daher global wirksam, unabhängig vom Ort ihres Ausstoßes. Da die Senken nicht ausreichen, um die durch den Men-

	Kohlen- dioxid CO ₂	Methan CH ₄	Distick- stoff- oxid N ₂ O	Freon-11 FCKW-11	Fluoro- form HFC-23	Trifluor- methan CF ₄
Vorindustrieller Wert	280 ppm	700 ppb	270 ppb	0	0	40 ppt
Konzentration 1998	365 ppm	1745 ppb	314 ppb	268 ppt	14 ppt	80 ppt
Rate der Konzentra- tionsveränderung in den goern [pro Jahr]	1,5 ppm	7,0 ppb	0,8 ppb	-1,4 ppt	0,55 ppt	1,0 ppt
Atmosphärische Lebensdauer in Jahren	ca. 100 (5-200)	12	114	45	260	> 50000

Tabelle 1: Die wichtigsten anthropogenen Spurengase und einige ihrer Charakteristika (nach IPCC 2001). Die Einheiten ppm, ppb und ppt sind aus dem Englischen übernommen und bedeuten parts per million, parts per billion und parts per trillion.

schen in die Atmosphäre eingebrachten Treibhausgase komplett zu entfernen, steigen ihre Konzentrationen an. Dabei verhält es sich so ähnlich wie mit der Staatsverschuldung bei uns in Deutschland, die durch laufende Neuverschuldung immer weiter in die Höhe getrieben wird. Selbst ein Zurückfahren der Neuverschuldung, sagen wir auf die Hälfte des Vorjahres, würde die Schuldenlast ansteigen lassen. Ein geringfügiges Zurückfahren des Ausstoßes der Treibhausgase durch den Menschen hätte einen entsprechenden Effekt, die Konzentrationen der meisten Treibhausgase würden trotzdem weiter ansteigen.

Der natürliche Treibhauseffekt

Wenn über das Klimaproblem gesprochen wird, fällt oft das Stichwort Treibhauseffekt, eine natürliche Eigenschaft der Erdatmosphäre. Es ist dieses Phänomen, das uns die optimalen Lebensbedingun-

gen auf der Erde garantiert. Wegen der Analogie mit den Vorgängen in einem Treibhaus, dessen Glasdach ebenfalls die Sonne gut durchlässt, die Wärme aber nicht hinauslässt, ist das hier beschriebene Phänomen auch als natürlicher Treibhauseffekt bekannt. Die dafür in der Atmosphäre verantwortlichen Gase werden häufig als Treibhausgase bezeichnet.

Bekanntlich sendet Materie elektromagnetische Strahlung aller Wellenlängen in Form von Photonen aus (Emission), und zwar um so mehr je wärmer der emittierende Körper ist. So sorgt beispielsweise die Emission elektromagnetischer Strahlung an der (heißen) Sonnenoberfläche für Energie in Form des sichtbaren Lichtes auf der Erde. Einfallende elektromagnetische Strahlung wird aber auch von Materie verschluckt (Absorption) und trägt dadurch zur Energieerhöhung der Umgebung bei, die sich meist in einer Erwärmung ausdrückt. Bei den im Vergleich zur Sonne niedrigen Temperaturen des irdischen Klimasystems findet die Emission elektromagnetischer Strahlung durch die Erdoberfläche und/oder Atmosphärenbestandteile überwiegend im nicht-sichtbaren, so genannten thermischen, Bereich des Spektrums (zwischen etwa 3 und 100 μm) statt, weshalb man auch oft von Wärmestrahlung spricht.

Wichtig ist auch, dass Emission und Absorption vor allem bei Gasen sehr stark von der Wellenlänge abhängen können, weshalb oft von Emissionslinien oder -banden (Ansammlungen von Linien) die Rede ist. Insbesondere bei den beiden wichtigen Treibhausgasen Wasserdampf (H_2O) und Kohlendioxid (CO_2) finden die wesentlichen Absorptions- und Emissionsvorgänge in solchen Banden statt. Dagegen besitzen gerade die beiden Hauptgase der Atmosphäre Sauerstoff (O_2) oder Stickstoff (N_2) im energetisch wichtigen Bereich des Spektrums keine wesentliche Emission und Absorption.

Bei einer Erde ohne Atmosphäre wäre die Oberflächentemperatur ausschließlich durch die Bilanz zwischen eingestrahelter Sonnenenergie und der von der Oberfläche abgestrahlten Wärmestrahlung

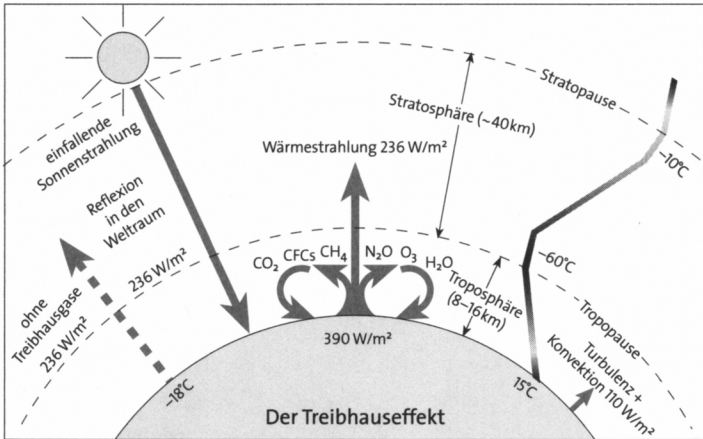


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Strahlungshaushaltes der Atmosphäre und des natürlichen Treibhauseffekts

festgelegt. Bei gleichem Rückstreuvermögen (Albedo) des Planeten wie heute würde diese Oberflächentemperatur im globalen Mittel etwa -18°C betragen, sie beträgt heute jedoch ca. $+15^\circ\text{C}$ (siehe Abbildung 4). Selbst eine Atmosphäre aus reinem Sauerstoff und Stickstoff, die ja die Hauptkomponenten (99%) unserer Atmosphäre bilden, würde daran nichts Wesentliches ändern: Unser Planet wäre eine Eiswüste.

Dagegen absorbieren Wasserdampf und in geringerem Maße auch CO_2 (und andere Spurengase) einen kleinen Teil der Sonnenstrahlung und geben selbst Wärmestrahlung ab. In Richtung zum Erdboden übertrifft diese zusätzliche Wärmestrahlung aus der Atmosphäre die Reduktion der Sonnenstrahlung und bewirkt so am Erdboden eine höhere Energieeinstrahlung, als dies ohne solche Gase der Fall wäre. Diese vermehrte Einstrahlung führt zu einer Erwärmung der Erdoberfläche und (infolge verschiedener Transportvorgänge) auch der unteren Atmosphäre.

Diese Erwärmung der Erdoberfläche führt aber auch zu einem Ausgleich der Strahlungsbilanz am Atmosphärenoberrand, denn im längerfristigen Mittel muss die Erde ja genau so viel Wärmestrahlung in den Weltraum abgeben, wie sie Strahlung von der Sonne absorbiert. Die von der Erdoberfläche nach oben gestrahlte Energie wird von den atmosphärischen Spurengasen (teilweise) auch absorbiert, gelangt also nur zum Teil direkt in den Weltraum. Dafür emittieren die Spurengase selbst entsprechend ihrer Temperatur, die aber wegen der Temperaturabnahme bei steigender Höhe in der Atmosphäre geringer ist als die der Erdoberfläche. Daher verlässt mit zunehmender Menge an Spurengasen bei konstanter Temperatur der Erdoberfläche immer weniger Energie in Form von Wärmestrahlung die Erde in den Weltraum. Durch die erhöhte Oberflächentemperatur wird dieses Defizit in der Strahlungsbilanz aber wegen der von der Erdoberfläche ausgehenden erhöhten Wärmestrahlungsmenge wieder ausgeglichen. Für diesen Ausgleich ist vor allem das atmosphärische Strahlungsfenster hilfreich, ein Spektralbereich bei $10\ \mu\text{m}$ Wellenlänge innerhalb dessen die Strahlung von der Oberfläche bei wolkenloser Atmosphäre in den Weltraum entweichen kann.

Messungen der Wärmeabstrahlung in den Weltraum durch Satelliten lassen auf eine Temperaturerhöhung der Erdoberfläche durch den natürlichen Treibhauseffekt von etwa 33°C schließen. Zu dieser lebenserhaltenden Erwärmung trägt Wasserdampf den weitaus größten Teil – ungefähr zwei Drittel – bei; es folgen Kohlendioxid (CO_2) mit einem Anteil von ca. 15%, Ozon mit etwa 10% und schließlich Distickstoffoxid (N_2O) und Methan (CH_4) mit jeweils ungefähr 3%. Die Existenz der Spurengase ist daher trotz ihrer geringen Konzentration einer der entscheidenden Faktoren, die unser Klima bestimmen.

Die Spurengase führen also insgesamt dazu, dass Wärme in der unteren Atmosphäre gefangen ist. Die Atmosphäre ist aber weitgehend transparent für die solare Strahlung.