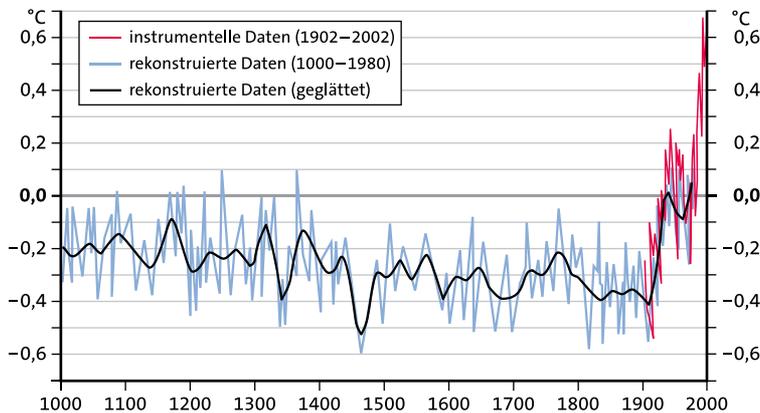


1 **Die Wikinger besiedeln um 985 Grönland und Nordamerika**

Klima im Wandel

Das Gemälde des Malers van de Venne zeigt Menschen auf einem zugefrorenen Gewässer. Viele künstlerische Darstellungen aus dieser Zeit verdeutlichen, dass damals die Winter über mehrere Jahrzehnte wesentlich kälter gewesen sind. Denn heute sind die niederländischen Kanäle im Winter meist eisfrei.

Tatsächlich war der Zeitraum Anfang des 15. bis in das 19. Jahrhundert in Europa eine Periode niedrigerer Temperaturen, vor allem in den Wintermonaten. Diese Klimaschwankung wird als „Kleine Eiszeit“ bezeichnet.

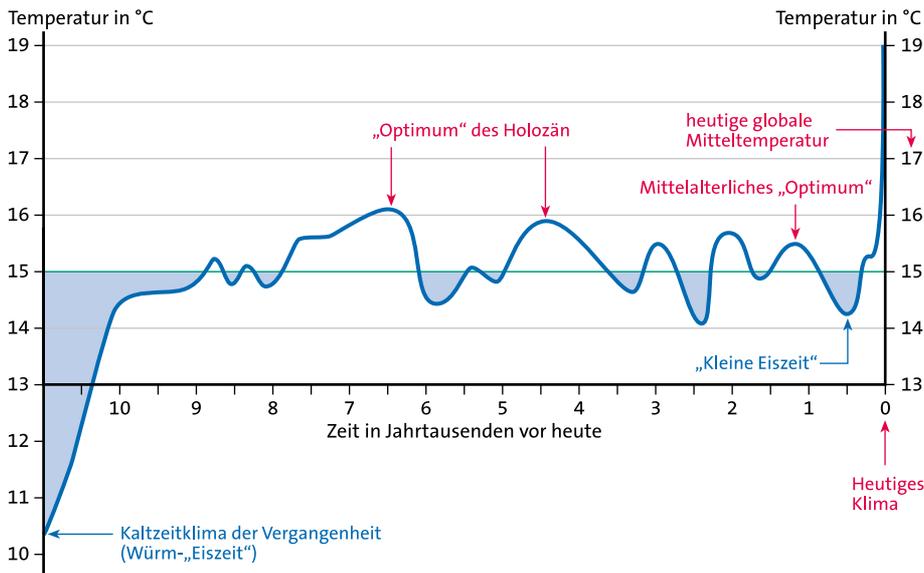


2 **Temperaturveränderung der letzten 1000 Jahre relativ zum Mittel 1961–1990**

4 **Die Kleine Eiszeit, eine frühneuzeitliche Klimakatastrophe**

„Die verregneten Sommer häuften sich, während langer Monate war oft kein Sonnenstrahl zu sehen; die Winter wurden kälter und sie dauerten länger. Eine Memminger Chronik berichtet, 1570 habe ein 'grausamer, schneeiger, windiger kalter, strenger und unveränderlicher Winter' geherrscht. Im tiefen Schnee sei es unmöglich gewesen, von einem Dorf zum anderen zu gelangen. Bodensee, Zürichsee und andere Alpenseen froren zu. Das Wintergetreide verdarb. Im Jahr darauf kam es zu einer der schlimmsten Hungerkrisen der frühen Neuzeit. Die Natur erstarrte in klirrendem Frost. Verzweifelte Menschen versuchten, sich von Gras und Baumrinde zu ernähren. Der Hunger trieb das Wild aus den Wäldern: Ernst Egli, Pfarrer von Chur, schreibt in einem Brief an Heinrich Bullinger davon, wie drei Näherinnen bei Zizers von Wölfen angefallen worden seien. Allein in den süddeutschen Reichsstädten dürften Hunger und Kälte Tausende von Opfern gefordert haben.“

Neue Zürcher Zeitung, 24./25. 01. 2004, S. 47



5 Temperaturveränderung der letzten 12 000 Jahre

Das Klima ist veränderlich, es schwankt, seit die Erde existiert: langfristig in Zeiträumen von über 100 000 Jahren oder kurzfristig in Zyklen von 10 bis 100 Jahren. Seit dem Pleistozän, das vor 1,8 Millionen Jahren begann, wechselten Kalt- und Warmzeiten ab. Dabei waren die mittleren Temperaturen in den Warmzeiten bis zu 3 Kelvin höher und in den Kaltzeiten bis zu 9 Kelvin niedriger als heute. Die vor etwa 11 000 Jahren einsetzende Erwärmung führte zum Abschmelzen des Inlandeises und erreichte vor etwa 6 000 bis 4 000 Jahren ein erstes Optimum. Etwa 2 Kelvin höhere Temperaturen als heute haben die Ausbildung eines Eichenmischwaldes ermöglicht. Auch die Blütezeit des Römischen Reiches fällt in eine solche Warmphase mit besonders niederschlagsreichen Wintern im Mittelmeerraum. Nur so konnte Nordafrika zur „Kornkammer“ Roms werden. Im mittelalterlichen Optimum besiedelten die Wikinger Grönland. Die Weinbaugrenze lag gegenüber heutigen Verhältnissen um 4 bis 5 Breitengrade nördlicher. In der „Kleinen Eiszeit“ gingen die Bauern in Süddeutschland vom Weinbau zur Bierherstellung über.

Klimazeuge Weinanbau

Ein verlässliches Zeugnis von Klimaschwankungen gibt etwa der Weinanbau: So sei im Hochmittelalter (11.–13. Jahrhundert) sogar bis nach Norwegen Wein angebaut worden. Heute wandert die Weinbaugrenze wieder nach Norden – wo sie schon einmal war: über den 52. Breitengrad hinaus, der als nördliche Anbaugrenze galt. So in Mecklenburg-Vorpommern und Brandenburg, wo seit kurzem wieder Weinbau betrieben wird. Forscher des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung rechnen bis 2020 mit Müller-Thurgau-Anbau in ganz Brandenburg. Sogar von den extrem Wärme beanspruchenden Weinsorten Riesling und Grauburgunder in Schweden wird dieser Tage berichtet. Alles klare Zeichen einer Klimaerwärmung.

- 1 Beschreibe die Klimaänderungen im Diagramm 2 und erläutere an ausgewählten Beispielen Auswirkungen auf das Leben der Menschen.
- 2 Informiere dich über die Bedeutung des Namens der Insel Grönland.

Aus der Klimageschichte der Erde

Präkambrium

Vor ca. 3 Milliarden Jahren, eisfreies Klima mit Temperaturen um bis zu 50 °C. Nach einer Abkühlung zwei Vereisungen vor ca. 2–2,5 Milliarden und vor ca. 750–550 Millionen Jahren.

Paläozoikum

Große klimatische Gegensätze; Europa lag am Äquator und hatte tropisches Klima.

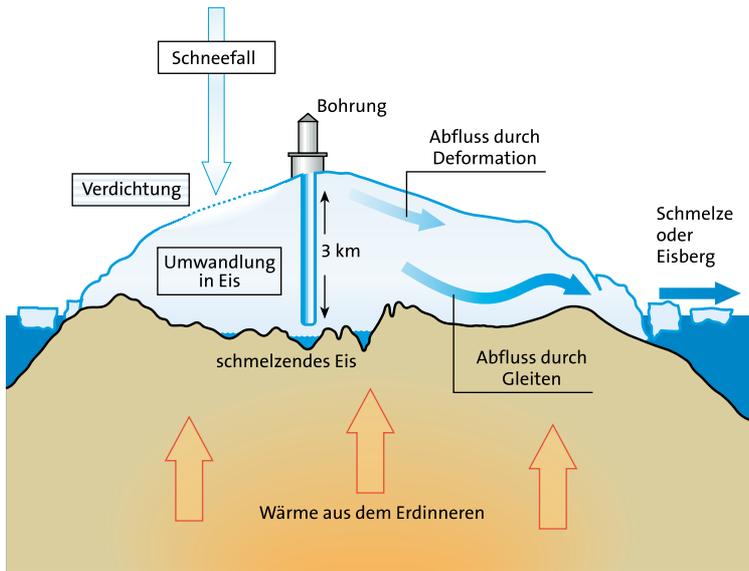
Mesozoikum

Überdurchschnittlich warmes Klima mit geringen Temperaturunterschieden.

Känozoikum

Globale Abkühlung und Vereisung der Antarktis vor etwa 40 Millionen Jahren; Vor etwa 2,4 Millionen Jahren Beginn des Wechsels von Warm- und Kaltzeiten.

Bedrohung und Schutz der Atmosphäre



Woher wissen wir eigentlich, wie das Klima früher war?

Erst seit etwa 300 Jahren werden in Europa Klimadaten gemessen und aufgezeichnet. Informationen über das frühere Klima erhalten Klimaforscher aus den unterschiedlichsten Archiven wie Chroniken, Schiffstagebüchern, phänologischen Aufzeichnungen oder Buchführungen über Preise von Wein und Getreide.

Um das Klima der Vergangenheit, das Paläoklima, zu rekonstruieren, nutzen die Wissenschaftler indirekte Klimadaten, die sogenannten Proxydaten, aus unterschiedlichen natürlichen Klimaarchiven wie Eisbohrkernen, See- oder Tiefseesedimenten, Pollen oder Baumringen.

Eisbohrkerne als Klimaarchiv

Inlandeis und Gletscher in Grönland und der Antarktis entstanden über lange Zeiträume hinweg. Der in mehreren Schichten zusammengepresste Schnee „enthält“ Informationen über die Bedingungen der Atmosphäre zum Zeitpunkt seines Fallens. Der bislang am tiefsten reichende Eisbohrkern wurde 2004 in der Antarktis von Mitarbeitern des Alfred-Wegener-Instituts gewonnen.

Wissenschaftler analysieren anschließend die in den Luftporen des Eises eingeschlossene Luft und gewinnen so Informationen über die Zusammensetzung der Atmosphäre zum Zeitpunkt des Schneefalls.

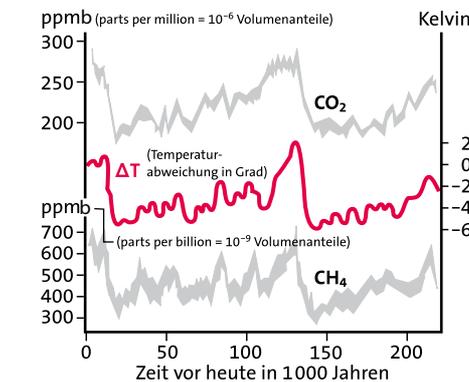
Durch eine Analyse des Verhältnisses der Sauerstoffisotope ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) kann auf die Temperaturen geschlossen werden, die bei der Entstehung des Niederschlags in der Atmosphäre herrschten. Auf diese Weise lässt sich die Lufttemperatur in den Polargebieten der Erde rekonstruieren.

Durch Abzählen von Jahresschichten kann man zu einer Datierung des Eiskerns gelangen. Einlagerungen wie Staub oder Vulkanasche ermöglichen eine genaue Datierung der Ablagerungen. Die sichtbar unterschiedliche Dicke der einzelnen Schichten erlaubt Rückschlüsse auf die jeweilige Niederschlagsmenge.

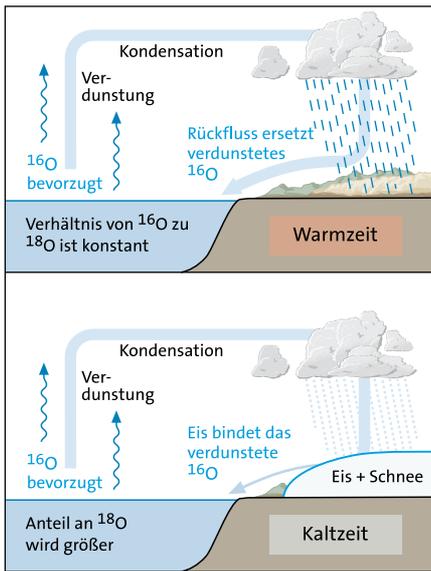
6 Eisbohrung in der Antarktis



7 Eisbohrkern „Vostok“ aus der Antarktis



9 Treibhausgasgehalt und Temperatur

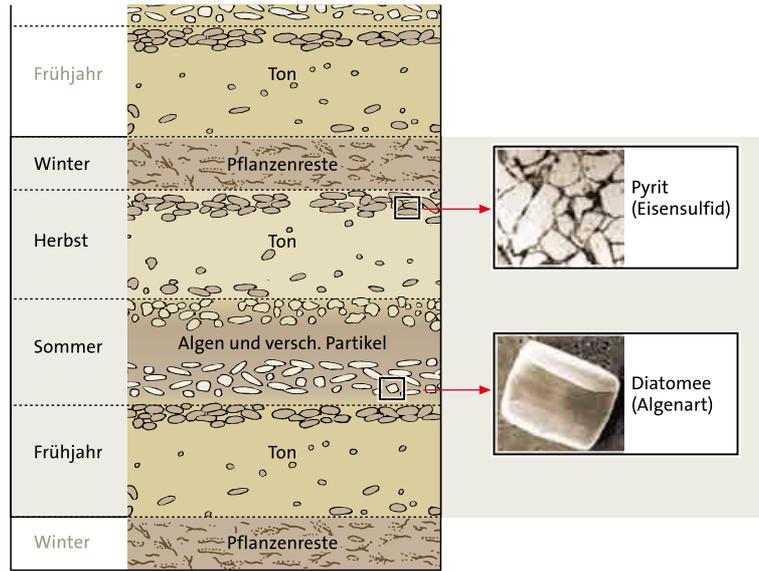


10 **Sauerstoffisotopenanalyse im Meeressediment**
(je kälter, um so mehr ^{16}O und desto weniger ^{18}O wird verdampft)

Sauerstoffisotopenanalyse

Die Bestimmung des Verhältnisses der Sauerstoffisotope ^{16}O und ^{18}O , die chemisch gleich, aber verschieden schwer sind (Sauerstoff ^{18}O hat zwei Neutronen mehr) ist eine der wichtigsten Standardmethoden zur Rekonstruktion der Paläotemperatur. Weil das Verhältnis der beiden Isotope temperaturabhängig ist, können absolute Temperaturwerte ermittelt werden. Das aus einer Probe ermittelte Isotopenverhältnis wird dazu mit einem Standard verglichen.

Je kälter es ist, desto schneller verdunsten im Meerwasser ^{16}O -Moleküle im Vergleich zu ^{18}O -Molekülen. In Kaltzeiten kommt es deshalb zu einer Anreicherung von ^{16}O in den Eismassen der Polarregionen. Ein Ungleichgewicht zwischen ^{16}O (höhere Anteile) und ^{18}O (geringere Anteile) entsteht. Weil große Mengen von ^{16}O -Molekülen im Eis gebunden sind, vergrößert sich in dieser Zeit der Anteil von ^{18}O im Meerwasser. Die Meeresorganismen lagern dann verstärkt ^{18}O in ihre Kalkschalen ein: für die Klimaforscher ein Hinweis auf niedrigere Temperaturen. Mit der Isotopenzusammensetzung können Wissenschaftler sogar die Paläotemperatur bestimmen.



11 **Warvenanalyse (Warven sind Jahresschichten von Sedimenten in Seen oder Meeren, die meist aus unterschiedlichen Teillagen bestehen.)**

Sedimente als Klimaarchiv

Sedimentablagerungen in Seen oder Meeren stellen ein weiteres Klimaarchiv dar. Im jährlichen Verlauf der Sedimentfolgen spiegeln sich Klima- und Umweltbedingungen wider. So enthalten die Ablagerungen biologisch eingeschlossenes Material, welches auf seine Zusammensetzung und seinen Aufbau untersucht werden kann (Pollen, Plankton, Organismen der Meeresböden). Während Pollen Informationen über die damalige Vegetation beinhalten, geben das Plankton und die im Sediment eingeschlossene Organismen Aufschluss über die Eigenschaften der Ozeane zur Ablagerungszeit, z.B. über Temperatur, Sauerstoffgehalt oder im Wasser vorhandene Elemente. Bohrungen in Tiefseesedimenten ermöglichen durch die Analyse des Sauerstoff-Isotopenverhältnisses in den Schalen fossiler Meerestiere Rückschlüsse auf frühere Temperaturen.

- 3 Erläutere Möglichkeiten zur Erforschung des Paläoklimas der Erde.
- 4 Eisschichten mit einem höheren relativen Anteil an ^{18}O weisen auf wärmere Zeiten hin. Erkläre.

Isotope des Sauerstoffs

Es gibt insgesamt 3 stabile Sauerstoff-Isotope:

^{18}O (~0.20%),

^{17}O (~0.04%) und

^{16}O (~99.76%).

Im flüssigen Zustand ist das Massenverhältnis von H_2^{16}O zu H_2^{18}O etwa bei 500:1, in der Gasphase wird dieses Verhältnis zugunsten des H_2^{16}O verschoben.

Bedrohung und Schutz der Atmosphäre

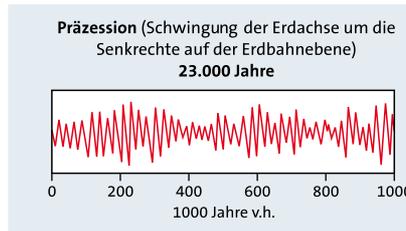
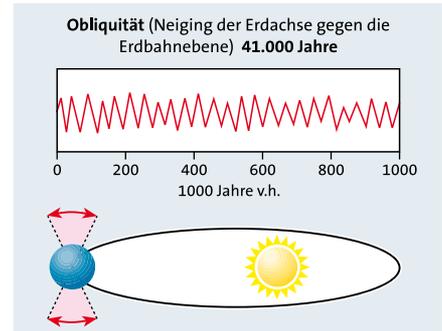
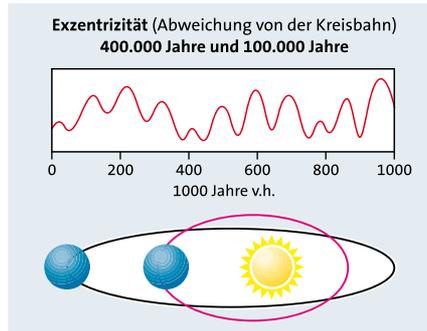
Einflussfaktoren globaler Klimaänderungen

Externe Faktoren (Faktoren, die das Klima beeinflussen, aber nicht vom Klima beeinflusst werden):

- Erdbahnparameter
- Tektonische Prozesse (Kontinentverschiebung, Vulkanismus)
- Solare Variationen
- Meteoriteneinschläge

Interne Faktoren (Faktoren, die das Klima beeinflussen und vom Klima beeinflusst werden):

- Ozeane
- Atmosphärische Zirkulationen
- Albedo (Eis- und Vegetationsflächen)
- Kohlenstoffkreislauf
- Zusammensetzung der Atmosphäre



12 Die wichtigsten Erdbahnparameter und ihre charakteristischen Zeitskalen (Zyklen)

Sonne und Klimawandel

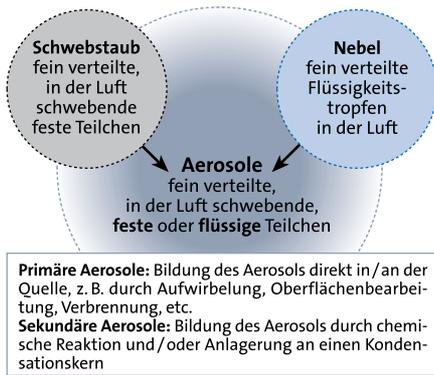
Bei einem mittleren Abstand von 150 Millionen Kilometern zwischen Sonne und Erde beträgt die auf die äußere Atmosphäre auftreffende Solarstrahlung gegenwärtig 1368 W/m^2 (Solarkonstante). Dieser Wert schwankt in einem Zyklus von 11 bzw. 80 Jahren zwischen 1325 bis 1420 W/m^2 . Das liegt an der elliptischen Umlaufbahn der Erde um die Sonne sowie dem Auftreten von Sonnenflecken. Sonnenflecken kommen zustande, weil starke lokale Magnetfelder den Aufstieg von heißer Materie aus dem Inneren der Sonne bis an die Oberfläche behindern. Ein mittlerer Sonnenfleck hat dabei etwa die Größe der Erdoberfläche. Mit zunehmender Zahl der Sonnenflecken erhöht sich die Strahlungsintensität der Sonne. In Jahren mit verminderter Fleckenanzahl verringert sie sich. Diese Variationen gehören zu den externen Einflussfaktoren auf das Klima der Erde. Die Intensität der Sonneneinstrahlung und Strahlungsverteilung auf der Erde wird aber auch durch Veränderungen der Erdbahnparameter (Abbildung 12) beeinflusst. Nach dem serbischen Astrophysiker Milutin Milankovitch werden die Zeiträume, in denen diese Parameter schwanken, Milankovitch-

Zyklen genannt. Sie stellen die Hauptursache für den Wechsel von Warm- und Kaltzeiten dar. Damit können aber auch andere natürliche Klimaschwankungen auf der Erde erklärt werden. Eine Reduzierung der Ursachen für Klimaänderungen auf die Variabilität der Sonneneinstrahlung ist jedoch aufgrund komplexer Wechselwirkungen im Klimasystem nicht möglich.

Es sind immer unterschiedliche Einflussfaktoren, die auf verschiedenen Zeitskalen Klimaänderungen bewirken.

B „Nach allem, was man über die beteiligten Strahlungsprozesse heute weiß und aufgrund der physikalischen Interpretation vergangener Klimaänderungen waren die Schwankungen des solaren Energieflusses und der Vulkanaktivität die wichtigsten Antriebsfaktoren für Klimaänderungen der letzten Jahrhunderte. Über Zeiträume von Jahrtausenden spielt die Änderung der Erdbahn um die Sonne und die damit verbundene Änderung in der geographischen Verteilung des solaren Energieflusses eine dominierende Rolle.“

DLR: DEKLIM – Deutsches Klimaforschungsprogramm.
www.deklm.de (20.06.2007)



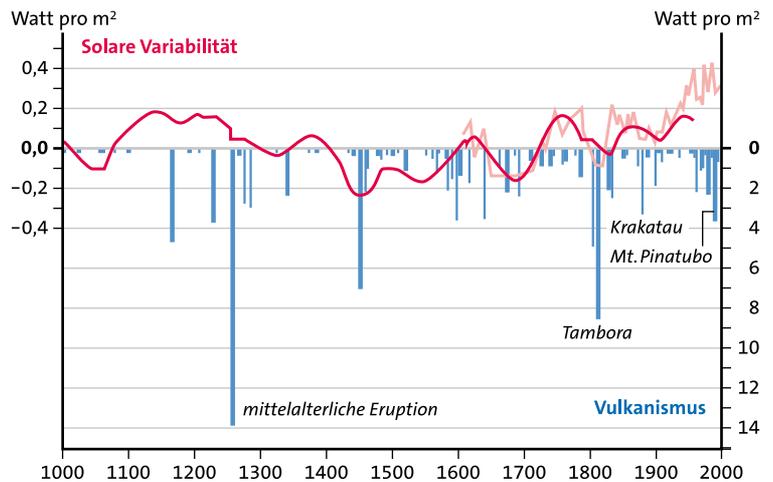
14 Aerosole

Vulkanausbrüche und Klimawandel

Hauptursache für die Abkühlung nach großen Vulkanausbrüchen sind nicht die Aschepartikel, die dabei in die Atmosphäre geschleudert werden, sondern Schwefeldioxid. Gelangt dieses Gas bis in die Stratosphäre, dann bilden sich sogenannte Aerosole, die sich zu einer dicken Schicht verbinden. Sie reflektieren einen Teil der Sonnenstrahlung ins Weltall zurück – auf der Erde kommt es zur Abkühlung. Als am 9. Juni 1991 der Pinatubo ausbrach, gab es für 2 Jahre eine globale Abkühlung um 0,5 °C. Der vulkanische Anteil an den Klimaänderungen zwischen 1400 und 1850 wird auf 41–49% geschätzt. In der Klimageschichte hatten große Meteoriteneinschläge ähnliche Auswirkungen auf das Klima wie Vulkanausbrüche.

Plattentektonik und Klimawandel

Plattentektonische Prozesse haben die Lage der Kontinente im Verlauf der Erdgeschichte ständig verändert. Befinden sich an den Polen große Landmassen, führt das zu einer stärkeren Reflexion der Sonnenstrahlen als bei einer Wasserfläche. Es kommt zu einer stärkeren Abkühlung und einer positiven Rückkopplung mit sinkenden Temperaturen und einer immer weiter fortschreitenden Eisbildung. Bei entsprechender Größe der Landmassen in Polnähe führt das Anwachsen der Eisdecke zu einem Sinken des Meeresspiegels. Weil sich damit auch die Wasseroberfläche verringert, kann weniger Wasser verdunsten und die Niederschläge nehmen ab.

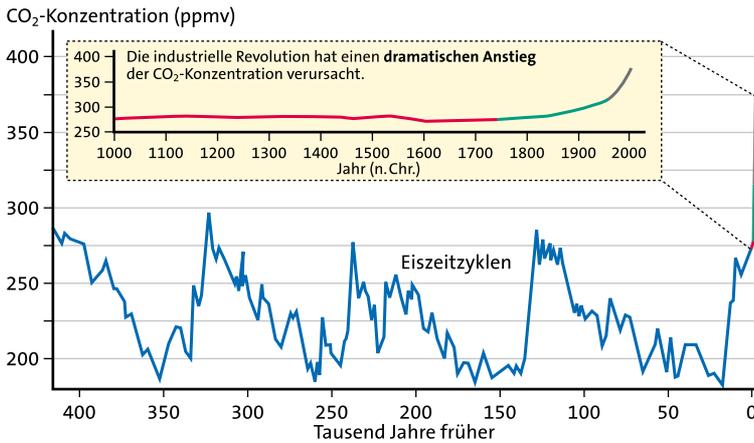


16 Variabilität des Strahlungsantriebes durch solare Einstrahlung und durch Vulkanismus als Abweichung vom Mittelwert des Zeitraums 1961–90; gezeigt werden bei der Sonneneinstrahlung zwei verschiedene Datenserien, die aus Eisbohrkernmessungen von ¹⁰Be (Beryllium) abgeleitet wurden, und beim Vulkanismus aus Eisbohrkernen und in den letzten Jahrzehnten aus optischen Eigenschaften der Atmosphäre abgeleitete Daten

- 5** Erläutere die Wirkung natürlicher Einflussfaktoren auf das Klima der Erde.
- 6** Begründe mithilfe deiner Kenntnisse zum Strahlungshaushalt die abkühlende Wirkung von Vulkanausbrüchen und Aerosolen auf das Klima.

Literaturtipp
de Boer, J. u. D. Sanders:
Das Jahr ohne Sommer. Die großen Vulkanausbrüche und ihre Folgen. Essen 2004.

Bedrohung und Schutz der Atmosphäre



11 **Rekonstruktion der CO₂-Konzentration seit 400 000 Jahren vor heute**

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)

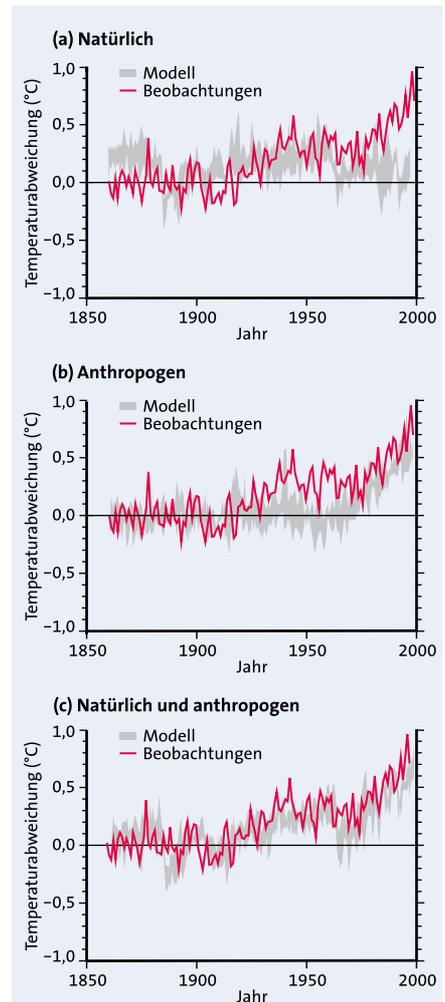
Das IPCC wurde 1988 von der World Meteorological Organisation (WMO) und dem United Nations Environment Programme (UNEP) eingesetzt, als die Hinweise auf eine globale Klimaänderung immer deutlicher sichtbar wurden. Das IPCC hat die Aufgabe, in regelmäßigen Abständen (etwa 5 Jahre) den Zustand des Klimasystems und seine Auswirkungen auf die menschlichen Gesellschaftssysteme festzustellen und Möglichkeiten der politischen Gegensteuerung zu benennen. Das IPCC betreibt keine eigene Forschung, sondern bedient sich der veröffentlichten wissenschaftlichen Literatur. Der jüngste Bericht erschien 2007. www.ipcc.ch

Mensch und Klimawandel

Der Kohlenstoffdioxid-Gehalt der Luft hat seit 1750 um 35 % von 280 ppm auf 379 ppm im Jahr 2005 zugenommen. Die Zuwachsrate der letzten 10 Jahre ist die größte seit 50 Jahren. Der heutige Wert ist der höchste in den letzten 650 000 Jahren. 78 % der Erhöhung gehen auf die Nutzung fossiler Brennstoffe und 22 % auf Landnutzungsänderungen (z. B. Rodungen) zurück. Andere wichtige Treibhausgase wie z. B. Methan und Lachgas, deren Anteile seit 1750 um 148 % bzw. 18 % zugenommen haben, machen zusammen etwa halb soviel aus wie der CO₂-Anstieg.

Die für Klimaänderungen verantwortlichen Änderungen der Strahlungsbilanz werden vorwiegend durch Kohlenstoffdioxid verursacht, in kleinerem Umfang auch durch andere Treibhausgase. Änderungen der solaren Einstrahlung haben dagegen nur einen geringen Einfluss.

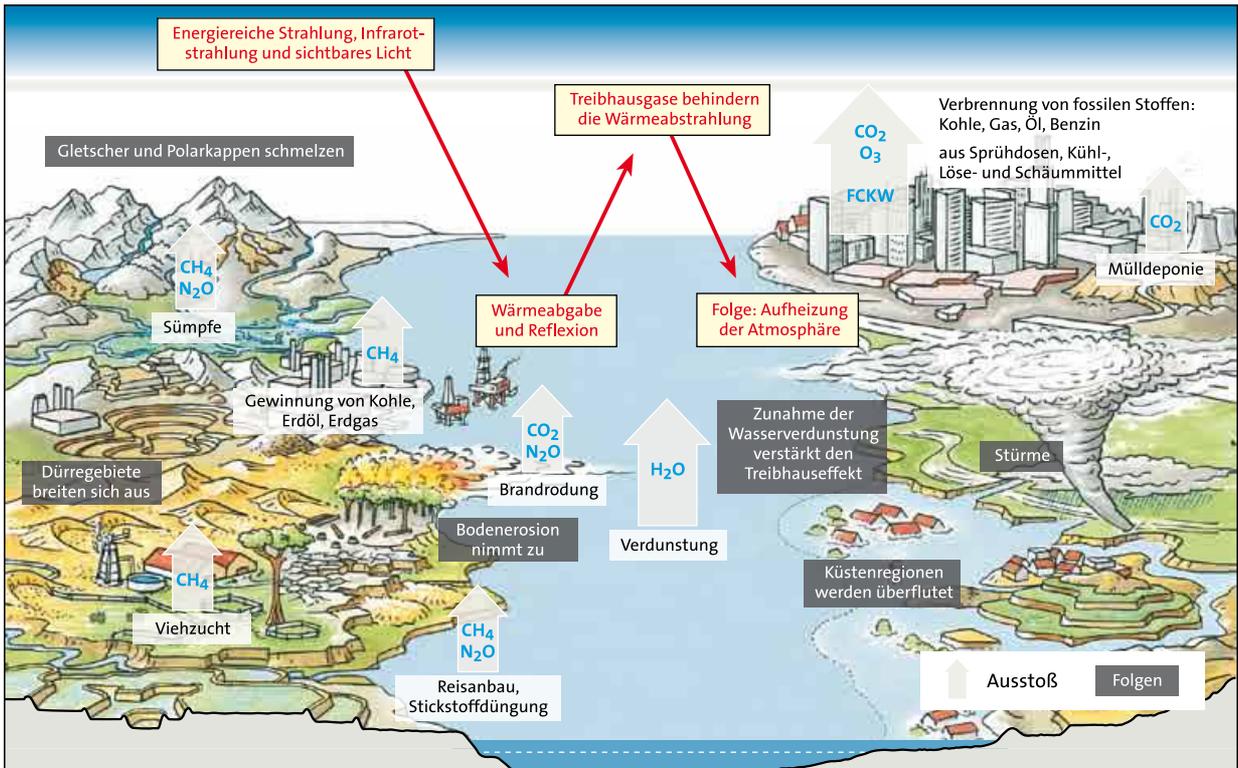
Die globale Oberflächentemperatur ist seit 1850 um +0,74 °C gestiegen, elf der letzten zwölf Jahre waren die wärmsten seit Beginn der meteorologischen Aufzeichnungen. Die Temperaturzunahme der letzten 50 Jahre ist doppelt so hoch wie die der letzten 100 Jahre, und die Arktis hat sich doppelt so stark erwärmt wie im globalen Mittel.



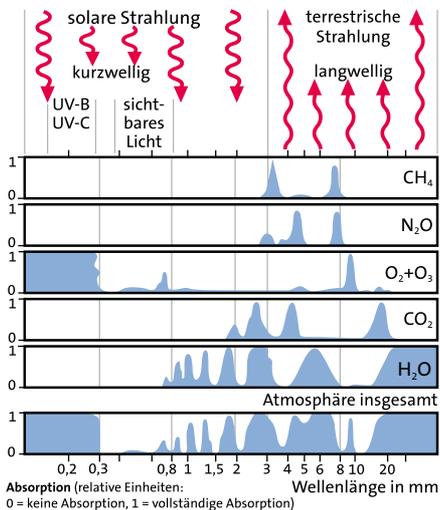
Das Band in (a) zeigt Simulationen, die nur natürliche Antriebsfaktoren berücksichtigen: Schwankungen der solaren Einstrahlung und vulkanische Aktivitäten. Das Band in (b) zeigt Simulationen, die anthropogene Antriebskräfte berücksichtigen: Treibhausgase und eine Schätzung bezüglich der Schwefelaerosole. In (c) sind sowohl natürliche wie auch anthropogene Antriebsfaktoren berücksichtigt. Nach IPCC 2001

12 **Vergleich zwischen Modellrechnungen und Beobachtungen des Temperaturanstiegs seit 1860 (Abweichungen vom Mittelwert 1961–90)**

Die Häufigkeit heftiger Niederschläge hat deutlich zugenommen. Es ist sehr wahrscheinlich, dass die Erwärmung der letzten 50 Jahre wesentlich durch anthropogene Treibhausgase (hauptsächlich Kohlenstoffdioxid) verursacht worden ist.



19 **Der Treibhauseffekt**



20 **Charakteristika einiger wichtiger Treibhausgase**

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	FCKW-11
Mittlere Verweilzeit in Jahren	50–200	12	114	45
Relatives Treibhauspotenzial ¹	1	23	296	4600
Beitrag zum anthropogenen Treibhauseffekt in Prozent ²	60	20	6	3

¹ Relatives molekulares Treibhauspotenzial gemessen an der Treibhauswirkung von CO₂ (= 1) über 100 Jahre

² Der Rest entfällt auf andere FCKW sowie auf das troposphärische Ozon

20 **Strahlungsabsorption durch atmosphärische Gase**

- 7 Erkläre Zusammenhänge zwischen menschlichen Aktivitäten und der globalen Erwärmung seit 150 Jahren.
- 8 Beurteile angesichts der Forschungsergebnisse des IPCC die Aussage: „Warmphasen hat es in der Klimageschichte häufig gegeben“.

- 9 Der Treibhauseffekt kann sich durch das Abschmelzen der polaren Eismassen oder die Erwärmung der Ozeane selbst verstärken. Erkläre.