

# Von Wolkensichten, Wärmespeichern und Vulkanen

## (einige Aspekte zur "Klimakatastrophe")

von Alfons Baier



Die Grundlage für die politische Diskussion bezüglich der "drohenden Klimakatastrophe" bilden verschiedene Hochrechnungen, welche hauptsächlich auf der Auswertung jüngerer Klimadaten und der Analyse von Energierohstoff-Nutzungen beruhen. Hieraus ergab sich, daß bereits ab dem letzten Jahrhundert bis heute eine chemische Veränderung der Spurengas-Konzentrationen in der Erdatmosphäre stattfand. Ursachen hierfür waren die schnell anwachsende Weltbevölkerung und somit ein rapide ansteigender Energieverbrauch -- vorwiegend durch fossile Brennstoffe -- sowie eine rasch zunehmende Industrialisierung und Intensivierung der Landwirtschaft. Nach den wenigen vorliegenden Meßreihen erhöhte sich zwischen 1850 und heute der Anteil des Kohlendioxids ( $\text{CO}_2$ ) in der Erdatmosphäre von 0,029 auf etwa 0,039 Volumenprozent. Sollte dieser Trend -- der Anstieg beträgt im Mittel etwa 2,9 ppm pro Jahr -- weiter anhalten, könnte der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre bis zum Jahre 2100 auf etwa das 2,2-fache oder auf den mehr als doppelten vorindustriellen Wert ansteigen. Jedoch wurden erst seit 1958 verlässliche Messungen des  $\text{CO}_2$ -Gehaltes der Luft durchgeführt. Die Übertragung dieser Meßergebnisse auf globale Verhältnisse erscheint zweifelhaft, da **nur an wenigen Stellen auf der Erde** zuverlässig und über einem längeren Zeitraum gemessen wurde. Trotzdem postulierten verschiedene Wissenschaftler, daß der global ansteigende Kohlendioxid-Gehalt der Luft eine Verstärkung des natürlichen Treibhauseffektes (dieser wird vor allem durch atmosphärischen Wasserdampf hervorgerufen) und somit eine starke Erwärmung der Erdatmosphäre bedingen könnte.



**Kohlendioxid** ( $\text{CO}_2$ ) ist ein farbloses Gas, das schwerer ist als Luft. Es entsteht vor allem bei der Verbrennung von kohlenstoffhaltigen Verbindungen wie Holz, Kohle und Kohlenwasserstoffen (z.B. Erdöl und seinen technischen

Folgeprodukten, Erdgas) sowie bei der natürlichen Oxidation kohlenstoffreicher Sedimente (z.B. humose oder torfige Böden), bei den Stoffwechselprozessen der höheren Lebewesen ("Atmung"), bei den verschiedenen Gärprozessen und ist natürlicher Bestandteil der vulkanischen Exhalationen (z.B. in den Maaren der Eifel) sowie vieler, aus tiefen geologischen Schichten entspringenden Mineralquellen (juveniles CO<sub>2</sub> in den "Säuerlingen").

Alle grünen Pflanzen nehmen Kohlendioxid aus der Luft auf, verwenden den Kohlenstoff zum Aufbau und scheiden den Sauerstoff wieder aus: Bei dieser **Assimilation** wird im pflanzlichen Chlorophyll Kohlendioxid und Wasser unter dem Einfluß des Sonnenlichtes ("Photosynthese") zu Kohlenhydraten ("Stärke") umgewandelt. Tiere und Menschen nehmen hingegen für ihre Stoffwechselprozesse Sauerstoff aus der Luft auf und atmen Kohlendioxid wieder aus.

Der stoffwechselphysiologische Primärvorgang der **Photosynthese** ist somit der wichtigste biochemische Vorgang auf der Erde. Alle Lebewesen leben direkt oder indirekt von den Assimilaten der Pflanzen; hierdurch wurde das Leben in seiner heutigen Form erst möglich. Die Energie zu seiner Erhaltung ist das Sonnenlicht, das im Laufe des Vorgangs der Photosynthese in chemische und somit in stabile Energie umgewandelt wird: Die grüne Pflanze stellt hierdurch eine geradezu ideale "Sonnenbatterie" dar.

**Regen und Schnee** bestehen trotz ihrer natürlichen Destillation keineswegs aus reinem Wasser: Die Gase der Atmosphäre sind darin gelöst, und zwar die chemisch aktiven, Sauerstoff und Kohlendioxid, in erhöhtem Anteil. So erhält das Niederschlagswasser bereits bei seinem Durchgang durch die Atmosphäre gelöstes Kohlendioxid; dies gilt in erhöhtem Maße für das versickernde Niederschlagswasser, denn der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Bodenluft kann infolge der Mikrobentätigkeit auf das 100-fache des Wertes in der Atmosphäre ansteigen.

Die **Weltmeere** nehmen rund 71 % der Erdoberfläche ein. Im Meerwasser lösen sich die Gase der Luft im gleichen Verhältnis wie im Süßwasser; die lebenswichtigen Gase Sauerstoff und Kohlendioxid sind also gegenüber der Luft angereichert. Meist ist hierbei jedoch das Gleichgewicht durch die Stoffwechselprozesse der Organismen gestört: Die obersten dreissig Meter der Wassersäule sind häufig durch die Assimilationstätigkeit des pflanzlichen Planktons an Sauerstoff

übersättigt. Vor allem Algen verbrauchen  $\text{CO}_2$  bei der Assimilation und setzen Sauerstoff frei. Die Photosynthese ist auf die obersten 100 m des Wasserkörpers beschränkt; in größeren Meerestiefen wird der Sauerstoff zunehmend durch Tiere zu Kohlendioxid veratmet. Wenn nicht Strömungen oder Durchmischungsvorgänge eine stetige durchgreifende Erneuerung der Wassersäule bedingen, schafft in tieferen Meeresbereichen das Verschwinden der letzten Spuren von Sauerstoff geeignete Lebensbedingungen für die sog. anaeroben Bakterien, welche ihren Energiebedarf unter Luftabschluß entweder aus der Zersetzung von Eiweiß oder der Reduktion von Sulfaten decken. Hierbei erzeugen sie als Stoffwechselprodukt Schwefelwasserstoff, welcher das Wasser für alle anderen Organismen vergiftet. Einige Bakterienarten erzeugen durch die Zerlegung von Eiweiß oder die Reduktion von Nitraten Ammoniak, welches Kohlendioxid bindet.

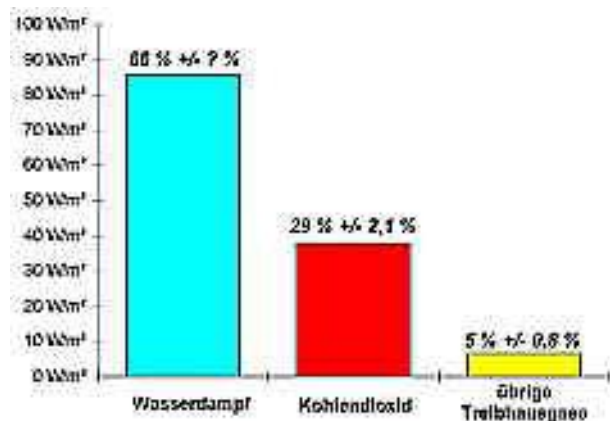
In der Atmosphäre lassen **"Treibhausgase"** wie atmosphärischer Wasserdampf und Kohlendioxid zwar das sichtbare Sonnenlicht durch die Lufthülle auf die Erdoberfläche passieren, absorbieren oder reflektieren jedoch die langwellige Infrarot-Wärmerückstrahlung von der Erdoberfläche in den Weltraum.

Der **"natürliche Treibhauseffekt"** wird durch das Vorhandensein von **Wasserdampf** und -- untergeordnet -- **Kohlendioxid** in der Erdatmosphäre hervorgerufen und bewirkt letztlich die

Durchschnittstemperatur unseres Planeten von  $+15^\circ\text{C}$ ; der Anteil des Wasserdampfes

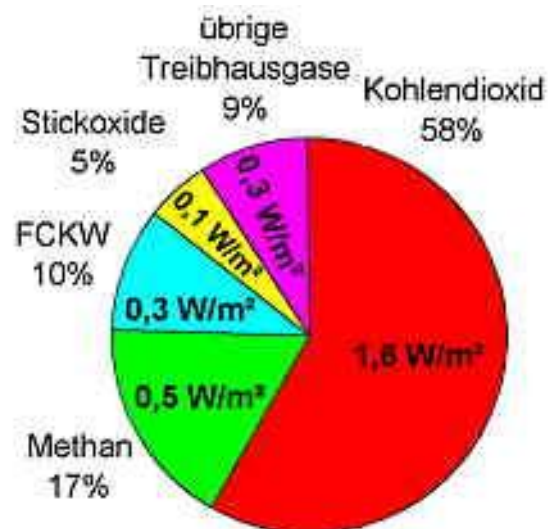
am Gesamt-Treibhauseffekt beträgt rund  $86 \text{ W/m}^2$  und jener des Spurengases Kohlendioxids rund  $38 \text{ W/m}^2$ . Weitere

**Spurengase**, die Infrarotstrahlung absorbieren, weisen seit Beginn unseres Jahrhunderts eine steigende Konzentration auf (der Anteil der Spurengase am Gesamt-Treibhauseffekt beläuft sich auf etwa  $7 \text{ W/m}^2$ ). Die Spurengase wirken mit, das "Wasserdampfenster", also jene Lücke im infraroten Absorptionsspektrum des Wasserdampfes, zu schließen. In dieser "Lücke" liegt das Maximum der Erd-Wärmeausstrahlung. Bedenklich erscheint, daß die Konzentrationen der anderen -- in der allgemeinen Diskussion weitgehend unberücksichtigten --



klimarelevanten Spurengase (v.a. Distickstoffoxid, Flurchlorkohlenwasserstoffe (FCKW's), Tetrachlorkohlenstoff und Methan) schneller steigt als die CO<sub>2</sub>-Konzentration; diese könnten jedoch in der Zukunft einen bedeutenden Beitrag zu Klimaänderungen liefern.

So ist in der Öffentlichkeit weitgehend unbekannt, daß das Spurengas **Methan** (CH<sub>4</sub>) als "atmosphärischer Wärmespeicher" etwa 15- bis 30-fach wirksamer ist als Kohlendioxid. Die heutige Methankonzentration in der Atmosphäre ist etwa dreimal höher als vor einigen Hundert Jahren.



Über 60 Prozent dieser rezenten Methanemissionen stammen von der Umsetzung pflanzlicher Substanz durch anaerobe Bakterien. Weitere Emissionsquellen von Methan sind vor allem Reisanbau, Rinderzucht, Biomassenverbrennung in tropischen Wäldern und Savannen, mikrobiologische Fäulnisprozesse z.B. in Mülldeponien und Kläranlagen (Deponiegas besteht aus 30% bis 60% aus Methan) und das Entweichen von Methangas bei der Förderung und Verteilung von Kohle, Erdöl und -gas.

Der Anteil der -- von den Menschen von der Mitte des 18. Jahrhunderts ab verursachten -- Steigerung des Treibhauseffektes beträgt 2,7 W/m² oder 2,1 %: Hierbei verursachten (nach Berechnungen von BERNER & STREIF 2001) die anthropogenen Kohlendioxid-Emissionen einen Anstieg von ca. 1,6 W/m² und die übrigen Spurengase einen Anstieg von etwa 1,1 W/m².

Beide Werte liegen allerdings noch im Bereich der Unsicherheiten, die bei der Bestimmung des Gesamt-Treibhauseffektes heute noch anzusetzen sind. Unbestritten ist jedoch, daß im Gesamt-Treibhaussystem der Wasserdampf mit rund 66 % der entscheidende Faktor für die Speicherung von Wärmeenergie auf der Erde ist.

Die verbreitete Darstellung der **CO<sub>2</sub>-Problematik** geht im Grunde von vergleichenden Betrachtungen mit unseren beiden Nachbarplaneten Venus und Mars aus.



Unter den Planeten unseres Sonnensystems nimmt die **Erde** mit ihren Luftschichten eine Sonderstellung ein.

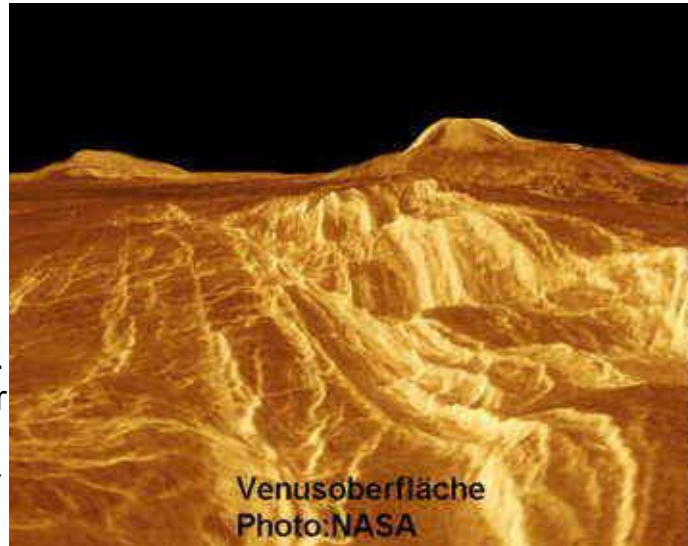
Die Atmosphären unserer Nachbarplaneten **Venus** und **Mars** bestehen zu etwa 95 Volumenprozent aus Kohlendioxid, während sich die Erdatmosphäre aus 78 Volumenprozent Stickstoff und zu ca. 21 Vol.-% aus Sauerstoff zusammensetzt; die restlichen Gase sind Argon, Neon, Helium und verschiedene Spurengase, unter ihnen auch Kohlendioxid mit rund 0,04 Vol.-%; hinzu kommt in sehr stark wechselnder Menge Wasserdampf mit einem Anteil von 0,01 Vol.-% bis 5 Vol.-%.

|                                                     | <b>Venus</b>        | <b>Erde</b>                 | <b>Mars</b>    |
|-----------------------------------------------------|---------------------|-----------------------------|----------------|
| <b>Stickstoff N<sub>2</sub> bzw. NO<sub>2</sub></b> | <b>3,40 %</b>       | <b>78,09 %</b>              | <b>2,70 %</b>  |
| <b>Sauerstoff O<sub>2</sub></b>                     | <b>&lt; 0,002 %</b> | <b>20,95 %</b>              | <b>0,13 %</b>  |
| <b>Argon</b>                                        |                     | <b>0,93 %</b>               |                |
| <b>Kohlendioxid CO<sub>2</sub></b>                  | <b>96,40 %</b>      | <b>0,04 %</b>               | <b>95,30 %</b> |
| <b>Neon</b>                                         |                     | <b>0,002 %</b>              |                |
| <b>Helium</b>                                       |                     | <b>0,0005 %</b>             |                |
| <b>Wasserdampf H<sub>2</sub>O</b>                   | <b>~ 0,01 %</b>     | <b>~ 0,01 % bis ~ 5,0 %</b> | <b>0,03 %</b>  |
| <b>Oberflächentemp. [°C]</b>                        | <b>+ 480°C</b>      | <b>+ 15°C</b>               | <b>- 60°C</b>  |
| <b>Atmosphärendruck an der Oberfläche [bar]</b>     | <b>95</b>           | <b>1</b>                    | <b>0,007</b>   |

Aus dem Vergleich der drei Planeten-Atmosphären baut i.w. die Schlußfolgerung auf, daß hohe CO<sub>2</sub>-Konzentrationen zu starken Erwärmungen führen. Dieses Postulat setzt voraus,

daß die Verhältnisse auf den beiden terrestrischen Planeten trotz der **500-fach unterschiedlichen Wasserdampfanteile** in den Atmosphären und den verschiedenen Sonnenabständen mit den Erdbedingungen vergleichbar sind.

Der Planet **Venus** ist in vielerlei Hinsicht die Schwester der Erde. Ihr Radius beträgt 95% des Erdradius und ihre Masse 81 Prozent der Erdmasse, so daß die Schwerkraft an ihrer Oberfläche in etwa der irdischen gleichkommt. Da die Venus näher an der Sonne ist als die Erde, müßte jeder Quadratmeter der Oberfläche dieses Planeten etwa doppelt so



viel Sonnenlicht wie die Erdoberfläche erhalten. So vermuteten Wissenschaftler bis in die siebziger Jahre ein warmes, angenehmes Klima unter der dichten Wolkendecke der Venus; auch das Vorkommen von Wasser wurde als wahrscheinlich angenommen. Als jedoch die ersten Raumsonden die dichten Schwefelsäure-Wolken-schichten durchdrangen, entpuppte sich die Venusoberfläche als eine heiße und tote Welt.

Unter der reinen und strahlenden Wolkendecke verbirgt sich eine höllische Venusoberfläche mit Temperaturen bis  $+480^{\circ}\text{C}$  und einem Atmosphärendruck von 95 bar. Die Venus entwickelte in ihrer Geschichte eine heiße, trockene und weitgehend sauerstofflose Atmosphäre, in welcher sich keine Lebensform entfalten konnte und jedes Meer sofort verdunsten würde. Ihre Atmosphäre enthält dieselben Bestandteile wie die Erdatmosphäre, jedoch in wesentlich anderen Konzentrationen: Unter den bis in eine Höhe von 70 km hinaufreichenden Schwefelsäurewolken liegt eine bodennahe Atmosphärenschicht, die hauptsächlich aus Kohlendioxid, einen kleinen Teil an Stickstoff(-oxid) und einer Spur Sauerstoff sowie einer verschwindend geringen Menge an Wasserdampf besteht.





Die schon vor drei Milliarden Jahren sehr dünne Atmosphäre des **Mars** läßt sich dadurch erklären, daß dieser Planet in seiner Urzeit wärmer war. Die Moleküle seiner Lufthülle waren deshalb in schneller Bewegung und konnten somit größtenteils das Schwerefeld dieses relativ kleinen Planeten verlassen.

Die **verschiedenen**

**Oberflächentemperaturen** der erdähnlichen Planeten Venus und Mars lassen sich nur durch ihre unterschiedlichen Sonnenabstände nicht schlüssig interpretieren. Die **Venus** ist etwa 100 Mio. km von der Sonne entfernt, die Erde 150 Mio. km und der **Mars** rund 230 Mio. km. Unter Berücksichtigung der verschiedenen Reflexionskoeffizienten (Albedos) der drei Planeten müßte auf der Venus eine Durchschnittstemperatur von  $-39^{\circ}\text{C}$ , auf der Erde von  $-18^{\circ}\text{C}$  und auf dem Mars eine Mitteltemperatur von  $-56^{\circ}\text{C}$  vorherrschen.

Die enorm verschiedenen Temperaturen auf den drei Planeten lassen sich dadurch erklären, daß auf der **Venus** eine sehr dichte Kohlendioxid-Atmosphäre vorherrscht. Auf der **Erde** wird der "natürliche Treibhauseffekt" durch das Vorhandensein von Wasserdampf und (untergeordnet) Kohlendioxid in der Atmosphäre hervorgerufen. Wasser beinhaltet latente Energie, die bei den Phasenänderungen (durch Verdunstung, Kondensation, Schmelzen und Gefrieren) umgesetzt wird. Wasser ist somit ein hauptsächliches Regulativ des Energiehaushaltes der Erde und des Wettergeschehens: Es ist *das* Klimaelement. Der Wasserdampf-Transport dient dem Wasserausgleich auf der Erde und der Wasserdampfgehalt schützt im Strahlungshaushalt das Klima der Erde. Nur in der prozentual zwar sehr  $\text{CO}_2$ -reichen, insgesamt jedoch äußerst dünnen Atmosphäre des **Mars** herrschen seiner astronomischen Stellung und seines Reflexionskoeffizienten entsprechende Temperaturverhältnisse vor.

Auf der Erde ist der **atmosphärische Wasserdampf** *das* Treibhausgas schlechthin: Es läßt zwar das sichtbare

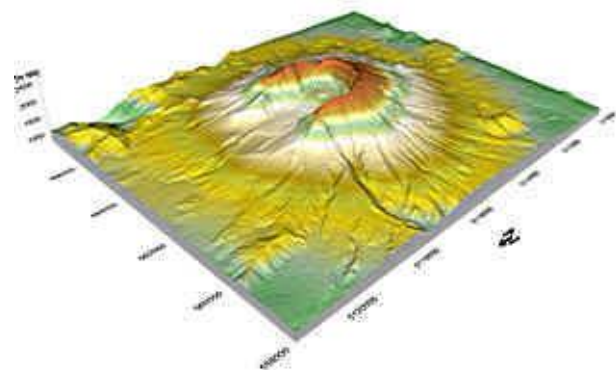
Sonnenlicht durch die Lufthülle auf die Erdoberfläche passieren, absorbiert oder reflektiert jedoch die langwellige Infrarot-Wärmerückstrahlung von der Erdoberfläche in den Weltraum. Dieser "natürliche Treibhauseffekt" wird hauptsächlich durch das Vorhandensein von Wasserdampf in der Erdatmosphäre hervorgerufen und bewirkt letztlich die Durchschnittstemperatur unseres Planeten von +15°C.

Ihr **Kohlendioxid** konnten die drei Planeten unterschiedlich gut zwischen Kruste und Atmosphäre austauschen:

Der Planet **Mars** ist heute -- samt seiner zweifellos vorhandenen Wassermengen -- tiefgefroren, weil er offenbar die Fähigkeit eingebüßt hat, das in seinen Gesteinen gebundene Kohlendioxid wieder in seine dünne Atmosphäre freizusetzen.

Die heiße, wasserlose **Venus** vermag wiederum das Kohlendioxid nicht mehr aus ihrer Atmosphäre zu entfernen, weswegen sich auf diesem Planeten ein Treibhauseffekt ungeheureren Ausmaßes ausbilden konnte. Auf der Venus gibt es keine Jahreszeiten wie auf der Erde. Ihre Oberfläche ist in fahles oranges Licht getaucht, da die dichte, wolkenreiche Atmosphäre bereits in großen Höhen 98% des Sonnenlichts verschluckt. Nur etwa 2 % des Sonnenlichts erreichen die Venusoberfläche. Die dort vorherrschende dichte Kohlendioxid-Atmosphäre hält die von der Oberfläche abgegebene Infrarot-Wärmestrahlung in geringen Höhen zurück, so daß dieser "Treibhauseffekt" die bodennahen Luftschichten auf mehrere hundert Grad Celsius aufheizt.

Auf der **Erde** bauten in der Frühzeit Vulkane die Atmosphäre auf: Sie spieen schmelzflüssiges Gestein aus und entließen Gase aus dem oberen Erdmantel, die hauptsächlich Wasserdampf, Kohlendioxid sowie Stickstoff und Schwefeldioxid enthielten. Die aus den vulkanischen Exhalationen entstandene CO<sub>2</sub>-reiche Uratmosphäre unterlag einem allmählichen Umwandlungsprozeß.



3D-Blockbild des Vulkan Mount St. Helens  
im Bundesstaat Washington/USA

In den Urmeeren existierten bereits vor mehr als 3 Milliarden Jahren Algen, welche über die Photosynthese befähigt waren,



Kohlendioxid und Wasser chemisch umzusetzen und hieraus Kohlehydrate als organischen Baustoff zu erzeugen. Bei dieser Reaktion wird also Kohlendioxid verbraucht und Sauerstoff als "Abfallprodukt" freigesetzt. Dieser Umwandlungsprozeß verlief sehr langsam: Am Ende des Präkambriums (vor ~570 Mio. Jahre) enthielt die Erdatmosphäre vermutlich erst ca. 1 Vol.-% Sauerstoff.

Eine schnellere Sauerstoffanreicherung (und somit eine Abnahme des Kohlendioxid-Gehaltes) der Atmosphäre erfolgte, als im Silur (vor ~440 Mio. Jahre) die ersten Pflanzen das Festland zu besiedeln begannen. Diese Ausbildung der Stickstoff/Sauerstoff-Atmosphäre war eine der entscheidenden Voraussetzungen für die Eroberung des Festlandes durch die ersten amphibischen Lebewesen im Devon (vor ~390 Mio. Jahre).

Die **heutigen Vulkane** stossen vor, während und nach der Eruption in grossen Mengen Gase sowohl aus dem Krater als auch in Form diffuser Entgasung an den Vulkanflanken aus. Diese Gase gelangen in großen Mengen bis hoch in die Atmosphäre und können dadurch das Klima im Weltmaßstab spürbar verändern.



**Ausbruch des Vesuv 1905**

Die Hauptbestandteile vulkanischer Gase sind  $H_2O$ , dann in veränderlichen Mengen (mit abnehmender Reihenfolge):  $CO_2$ ,  $SO_2$ ,  $H_2S$ ,  $CO$ ,  $COS$ ,  $CH_4$ ,  $H_2$ ,  $HCl$ ,  $HF$ ,  $O_2$ ,  $S_2$ ,  $N_2$ ,  $CS_2$ ,  $SO_3$ ,  $NH_4$ ,  $B$ ,  $Br$  u.a.

Die Ausgasungen der verschiedenen Vulkane sind jedoch höchst unterschiedlich: So wurden (nach Angaben von BARDINTZEFF (1999)) beim Nyiragongo (einem Lavasee in Zaire) 47 Mol-%  $H_2O$  und 45 Mol-%  $CO_2$  gemessen, während der Ätna im Jahre 1978 81 %  $H_2O$  und 2 %  $CO_2$  entgaste. Insgesamt wird die weltweite Menge des durch Oberflächenvulkane freigesetzten  $CO_2$  pro Jahr auf  $34 \pm 24 \times 1.000.000$  to  $CO_2$  durch passive Entgasung und  $31 \pm 22 \times 1.000.000$  to  $CO_2$  durch Vulkanausbrüche geschätzt.

Insgesamt stammt der Hauptteil des CO<sub>2</sub> in der Erdatmosphäre aus dem Erdinneren, kommt aber nicht nur aus den Vulkanen, sondern tritt als sog. "juveniles Kohlendioxid" aus einer Vielzahl von Stellen, die teilweise recht unspektakulär aussehen.



Es ist dies eine natürliche Folge der Plattentektonik, der hierdurch bedingten Aufschmelzung von z.B. Carbonatgesteinen und der so verursachten Freisetzung von Kohlendioxid, das dann aus Schwächezonen der Erdkruste -- nicht nur Vulkane in tektonisch aktiven Gebieten, es mögen z.B. auch die Myriaden von Trennflächen wie Klüfte oder Störungszonen in der Erdkruste sein -- nach mehr oder minder langer Zeit wieder austritt.

Dieser CO<sub>2</sub>-Kreislauf ist prinzipiell so alt wie die Erde. Eine exakte Quantifizierung der gesamten, aus dem Erdinneren ausströmenden CO<sub>2</sub>-Mengen ist heute noch nicht möglich. Dies liegt einfach darin begründet, daß es unmöglich ist, an einer genügend großen Anzahl von Stellen (so z.B. an den Ozeanböden) kontinuierlich zu messen: Erst so könnte über ein dichtes Meßnetz eine genaue Quantifizierung der insgesamt ausgasenden Kohlendioxidmengen vorgenommen werden.

Auf unserem Planeten wurde (und wird) der überwiegende Teil des atmosphärischen Kohlendioxids von sogenannten "**CO<sub>2</sub>-Senken**" wie **Wäldern** und v.a. dem **Meerwasser aufgenommen**. Auch das vom submarinen Vulkanismus freigesetzte CO<sub>2</sub> wird in den Ozeanen in bedeutenden Anteilen in der Wassersäule gelöst, wobei die Kohlendioxidlösung mit zunehmender Wassertiefe stark zunimmt. So ist aufgrund des hohen CO<sub>2</sub>-Gehaltes in Meerestiefen unter 4000 m keine Carbonatsedimentation mehr möglich, weil hier die hohen, im Wasser enthaltenen Kohlendioxidmengen jedes evtl. ausgefallene Carbonatkristall sofort wieder auflösen würden. In den oberflächennahen Wasserschichten wird ein Großteil des

CO<sub>2</sub> z.B. vom Nannoplankton verbraucht und dringt somit erst gar nicht in die Atmosphäre vor. Umgekehrt löst sich das in der Atmosphäre enthaltene CO<sub>2</sub> zum gleichen Anteil im (Meeres-, Fluss-, See-, Bach-, etc.-)Wasser. Auch am Festland wurden und werden in auch nur mäßig tiefen geologischen Schichten relativ große juvenile Kohlendioxidmengen beobachtet, die v.a. in Tiefenwässern gelöst sind (z.B. in Mineralwässern) oder aufsteigen (z.B. Maare der Eifel).

Die CO<sub>2</sub>-Kreisläufe und Wechselwirkungen sind heute jedoch noch nicht so genau erfasst, wie dies i.a. gerne dargestellt wird. Hierzu ein Beispiel: Eine der wichtigsten Größen im globalen Kohlenstoffkreislauf ist der Austausch von CO<sub>2</sub> zwischen der Atmosphäre und dem Meer. Wie viel Kohlendioxid vom Ozean aufgenommen oder abgegeben wird, hängt von mehreren Faktoren ab. Hierbei kommt der Windgeschwindigkeit besondere Bedeutung zu: Schon seit längerem ist nämlich bekannt, daß der Gasaustausch umso grösser ist, je höher die Windgeschwindigkeit ist. Allerdings erweist sich der Zusammenhang zwischen diesen beiden Größen nicht als linear, sondern der Gasaustausch nimmt mit der zweiten bis dritten Potenz der Windgeschwindigkeit zu.

Um den CO<sub>2</sub>-Austausch zwischen der Atmosphäre und dem Ozean zu bestimmen, ging man üblicherweise vom Mittelwert der Windgeschwindigkeit aus und postulierte zusätzlich Annahmen bezüglich der regionalen Verteilung der Windgeschwindigkeit. Nicolas BATES von der Bermuda Biological Station for Research in Ferry Reach und Liliane MERLIVAT von der Université Pierre et Marie Curie in Paris konnten nun aber zeigen, daß mit diesem Modell den Gasaustausch zwischen Ozean und Atmosphäre beachtlich unterschätzt wird.

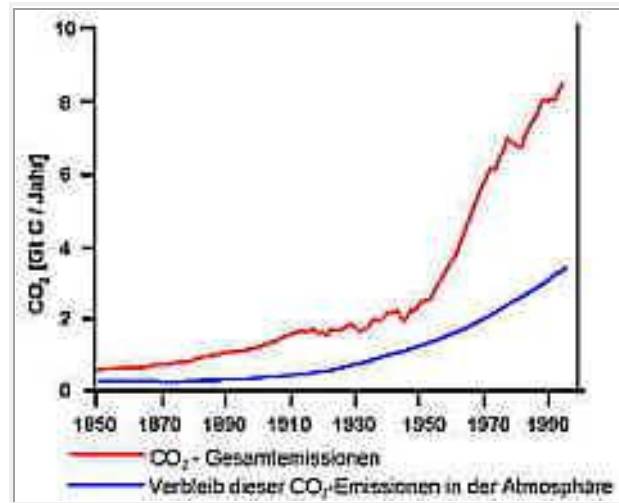
Bates und Merlivat führten im Gebiet um die Bermudas detaillierte Messungen durch, wobei sie insbesondere die Stundenwerte der Windgeschwindigkeit an den Meßstellen beobachteten. Anhand dieser Daten berechneten sie dann den CO<sub>2</sub> -Austausch und verglichen die ermittelten Werte mit den Resultaten, die sie mit dem herkömmlichen Verfahren erhalten hatten.

Als Ergebnis dieser Untersuchungen berichteten die beiden Forscher (in Geophys. Res. Let. **28**,17: 3281-3284, 2001), daß aus den hochauflösenden Winddaten ein Gasaustausch resultiert, welcher zwischen 30% und 200% höher ist, als die Ergebnisse, welche sich auf die Berechnungen mit den Tagesmittelwerten der Windgeschwindigkeiten stützen.

Ein massgeblicher Grund für diese grosse Differenz ist nach Ansicht der beiden Autoren, daß starke, aber nur kurzzeitige Winde, wie sie z.B. beim Durchzug einer Kaltfront auftreten, beim herkömmlichen Verfahren zu wenig stark gewichtet wurden: Gerade bei diesen hohen

Windgeschwindigkeiten findet jedoch der stärkste CO<sub>2</sub>-Austausch zwischen Atmosphäre und Meer statt.

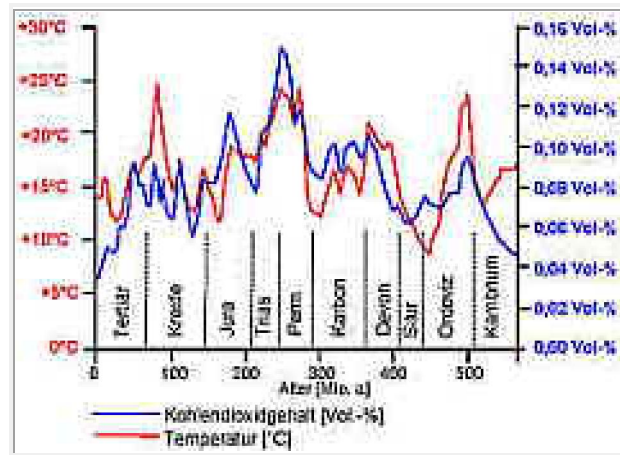
Bedingt durch die sog. "CO<sub>2</sub>-Senken" stieg und steigt die Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre nicht im gleichen Maße an, wie der Ausstoß von Kohlendioxid erfolgte.



Die Weltmeere enthalten heute in gelöster Form das 60-fache des in der Atmosphäre vorhandenen Kohlendioxids. Wie oben beschrieben, wird v.a. im Meer das CO<sub>2</sub> von Plankton und Schalentieren verbraucht und nach deren Tod schließlich in Form von Karbonatgesteinen (wie Kalken und Dolomiten) gebunden. In diesen Gesteinen ist etwa 100.000-mal mehr Kohlendioxid gebunden als in der Atmosphäre (Karbonate enthalten ebensoviel CO<sub>2</sub> wie die Venusatmosphäre). Würde diese gesamte Menge in gasförmiges CO<sub>2</sub> verwandelt und in die Atmosphäre abgegeben werden, ergäbe dies' das Hunderttausendfache der CO<sub>2</sub>-Menge, welche die Erdatmosphäre gegenwärtig enthält.

Ohne die Vorgänge der **Kontinentaldrift** wäre auf der Erde das in den Karbonatgesteinen enthaltene Kohlendioxid für alle Zeiten der Atmosphäre entzogen. Die (Karbonat-) Meeressedimente tauchen jedoch bei der Kontinentalverschiebung an den Subduktionszonen tief in die Asthenosphäre ab. Dort werden die Karbonate aufgeschmolzen und somit Kohlendioxidgase freigesetzt. Diese finden schließlich durch Vulkanschlote u.ä. ihren Weg zurück in die Atmosphäre (vulkanische Exhalationen enthalten meist zwischen 10 % und 45 % CO<sub>2</sub>). Hier verbleibt das Kohlendioxid, bis es durch Photosynthese zerstört wird oder erneut in Karbonatgesteinen gebunden wird.

Im Laufe der Erdgeschichte war die chemische Zusammensetzung der **Erdatmosphäre niemals stabil**. Stets bestimmten die Einflüsse mikrobiellen, pflanzlichen und tierischen Lebens die Zusammensetzung der Luftschicht; umgekehrt wurden auch die Lebensformen durch die Zusammensetzung der Atmosphäre beeinflusst. Unsere heutige Atmosphäre ist das Ergebnis eines ausbalancierten Gleichgewichtes, welches sich das Leben im Laufe seiner Evolution selbst geschaffen hat.



In der geologischen Vergangenheit der Erde schwankte der atmosphärische  $\text{CO}_2$ -Gehalt und war -- neben der  $\text{CO}_2$ -Lösung im Meerwasser -- stark abhängig vom Pflanzenwuchs auf der Erde. In manchen Erdzeitaltern absorbierten riesige Wälder einen Großteil des Kohlendioxids (und setzten

Sauerstoff frei), was beispielsweise in den urtümlichen, fremdartigen Wäldern der Karbonzeit der Fall war. Die Rekonstruktionen der Paläoklimata und der Abschätzungen der zugehörigen Kohlendioxid-Konzentrationen in den fossilen Atmosphären ergaben, daß die Lufttemperaturentwicklungen und die Kohlendioxidgehalte nicht immer in Korrelation zueinander standen. Vielfach vergingen mehrere Zehnermillionen Jahre, bis die Lufttemperaturen den Kohlendioxidgehalten folgten oder das Kohlendioxid die Temperaturentwicklung einholte.

Betrachtet man das Klimageschehen der geologischen Vergangenheit im Einzelnen, so finden sich für die -- über vier



Milliarden lange -- Zeitspanne des **Präkambriums** und des **älteren Paläozoikums** zunächst nur wenig konkrete Klimazeugnisse. Die für diesen Zeitraum rekonstruierbaren Paläoklimata sind nur sehr lückenhaft erfassbar; das Gesamtbild wird umso unsicherer, je weiter zurück man sich in die Erdgeschichte begibt. Erst im **Jungpaläozoikum** werden die Klimazeugnisse etwas zahlreicher und konkreter.



Das **Karbon-** und **Perm-**Zeitalter (vor 345 bis 225 Mio. Jahren) weisen auf der Nordhalbkugel sehr gegensätzliche Züge auf. Im Karbon herrschte überwiegend warmes, sehr niederschlagsreiches Klima vor, während im Perm extrem trockene (aride) Klimaverhältnisse auftraten. Beide Zeitalter brachten weltwirtschaftlich wichtige, vom damaligen Klima abhängige Lagerstätten hervor: In den Karbonschichten tritt die Hauptmenge der Kohlen in Nordamerika und Europa auf; das Perm ist die wichtigste Salzformation der Erdgeschichte.



Das gesamte **Mesozoikum** (vor 225 bis 65 Mio. Jahren) war eine ausgesprochene Wärmezeit. Charakteristisch für die paläogeographischen und somit auch für die paläoklimatologischen Verhältnisse waren überwiegend weit ausgedehnte Landflächen mit meist geringem Relief. Sichere Vergletscherungen sind aus diesem Zeitalter unbekannt und sogar die Polargebiete zeichneten sich durch relativ warmes Klima mit reicher Vegetation aus. Im "Urmittelmeer", der "Tethys", wuchsen mächtige Riffe.



Im Mesozoikum erreicht auch die Entwicklung der Reptilien ihren Höhepunkt; vor allem die riesenhafte Entwicklung der Dinosaurier deutet auf warme, feuchte Witterung hin. Ein Großteil des Klimabildes auf der Nordhalbkugel lässt sich nicht durch eine -- infolge der Kontinentaldrift -- stark veränderte Breitenlage der Kontinente erklären, sondern hauptsächlich durch eine hohe Durchschnittstemperatur der Erdatmosphäre.

Das **Tertiär** (vor 65 bis 2 Mio. Jahren) war ebenfalls durch ein wärmeres als unser heutiges Klima gekennzeichnet: Die globale Durchschnittstemperatur betrug bis  $+20^{\circ}\text{C}$ . Im "Europa" der Alttertiärzeit wuchsen subtropische Palmen. Das Verbreitungsgebiet der Krokodile reichte bis in das Gebiet des heutigen England. Die ausgedehnten Braunkohlenvorkommen in Deutschland weisen für lange Abschnitte der Tertiärzeit auf warme und sehr niederschlagsreiche Witterung hin. Die Bernsteinwälder im Gebiet der heutigen Ostseeküste werden als Savannenwälder gedeutet.

Im Alttertiär trugen die Polargebiete reiche Waldvegetation; polare Eiskappen existierten wahrscheinlich nicht. Generell machte sich allerdings während der etwa 60 Millionen andauernden Tertiärzeit eine



allmähliche Abkühlung bemerkbar. In der Jungtertiärzeit fand ein wiederholtes Schrumpfen und Wiederausdehnen der in Europa beheimateten tropischen Regenwälder statt. Generell kann das Zurückgehen der europäischen Regenwälder am Ende des Tertiärs nur dadurch begründet werden, daß ein Klimawechsel eingesetzt hatte. Am Ende des Tertiärs (vor ca. 2 Mio. Jahren) waren schließlich fast die heutigen Klimaverhältnisse erreicht.

Auch unser jetziges Erdzeitalter, das **Quartär**, war durch einen **zyklischen Klimagang** gekennzeichnet. Im Quartär gab es vier große Gletschervorstöße und somit vier Eiszeiten. Sie wurden von den beiden deutschen Geologen Albrecht PENCK und Eduard BRÜCKNER nach den vier süddeutschen Flüssen Günz, Mindel, Riß und Würm benannt. Besonders ab dem Cromer-Komplex (-850.000 bis -475.000 Jahre) trat ein "wilder" Kurs der Klimakurve auf. Charakteristisch war der stete Wechsel von Kaltzeiten (Glaziale) und Warmzeiten (Interglaziale). In den Glazialen bildeten sich gewaltige Eiskappen aus. In den Interglazialzeiten war das Klima etwas wärmer und feuchter als das heutige.

Die Abkühlung des Klimas der gemäßigten Breiten erfolgte bereits Ende des Tertiärs im Pliozän. Eine erste Kaltzeit -- noch ohne große Gletschervorstöße -- begann vor etwa 1,6 Mio. Jahren. Ihr folgte vor ca. 1,4 Mio. Jahren eine Warmzeit. Vor rund 1,2 Mio. Jahren setzte in Europa mit der Günz-Eiszeit die erste große Vereisungsperiode ein.





In der folgenden Zeitspanne folgten die Cromer-Zeit mit Wechsel von Kaltzeiten und Warmzeiten und zwei weitere, durch eine Zwischeneiszeit getrennte Eiszeiten (Mindel- und Riß-Glazial). Auf die Rißeiszeit folgte eine weitere Warmzeit (Riß/Würm-Interglazial), welche vor etwa 70.000 Jahren durch die bislang letzte Vereisungsperiode, das Würm-Glazial, beendet wurde. Während seiner größten Ausdehnung bedeckte allein das nordische Inlandeis in Europa eine Fläche von 6,7 Mio. km<sup>2</sup>; dies entspricht ziemlich genau der Hälfte des heutigen antarktischen Eises. Der nordamerikanische Eisschild erreichte mit 13,4 Mio. km<sup>2</sup> sogar eine etwas größere Ausdehnung als die heutige Antarktis. Auf der gesamten Erde breiteten sich insgesamt etwa 44 Mio. km<sup>2</sup> Eisflächen aus (gegenüber 15 Mio. km<sup>2</sup> in der Gegenwart).



Seit dem Beginn der Altsteinzeit vor etwa 500.000 Jahren war es immer wieder zu Kalt- und Warmzeiten gekommen, welche jeweils mindestens 1.000 Jahre andauerten. Diese Klimaumschwünge, bei denen die mittlere Wintertemperatur bis

10°C abfiel bzw. anstieg, vollzogen sich in Europa oftmals innerhalb eines Jahrzehnts.

Das Eem-Interglazial war das jüngste, rund 11.000 Jahre andauernde Gegenstück zur heutigen Warmzeit. Damals herrschten in Europa relativ ausgeglichene Klimaverhältnisse, wobei sich zunächst Birken und Kiefern ansiedelten. Im weiteren Verlauf stiegen die mittleren Julitemperaturen auf rund +20°C, wobei auch milde Winter vorgeherrschen. Dieser wärmste Abschnitt des Eem dauerte rund 2.200 Jahre. Danach verschlechterte sich die Klimaverhältnisse wieder, wodurch sich die Kiefernwälder weitläufig ausbreiteten. Diese Vegetationsverhältnisse waren vergleichbar der heutigen skandinavischen oder russischen Nadelwaldzone. Als die Temperaturen im späten Eem-Interglazial noch weiter absanken, wurden die Kiefernwälder zurückgedrängt und die Pflanzen der Tundra begannen sich auszubreiten. Am Ende des Eem sanken die Temperaturen sehr schnell und ohne wesentliche Schwankungen bis zu den Verhältnissen der folgenden Weichsel-Kaltzeit ab.

Diese Weichsel-Kaltzeit (die letzte "Eiszeit") dauerte von 117.000 bis 11.500 Jahre vor heute. In dieser Kaltzeit herrschten in Mitteleuropa aber nur zeitweise arktische Verhältnisse: Mehrere Male erwärmte sich das Klima während der so genannten Interstadiale, so dass sich in Deutschland Wälder ausbreiten konnten. Die mittlere Julitemperatur betrug während der Interstadiale meist um +15°C.

Während der dazwischen auftretenden Kaltzeiten ("Stadiale") sank jedoch die mittlere Julitemperatur unter +10°C und erreichte bei den mittleren Januartemperaturen nur -15°C. In diesen durch deutliche Gletschervorstöße gekennzeichneten Kaltphasen war das eisfreie, d.h. nicht von Gletschern oder dem mächtigen Inlandeis bedeckte Mitteleuropa von einer Zwergstrauchtundra mit Heidekraut und Krähenbeeren besiedelt, welcher im weiteren Verlauf oftmals eine Grastundra folgte.





Vor etwa 64.000 Jahren begann die Hauptphase der Weichsel-Kaltzeit. In den kühlen und sehr kurzen Sommern mit mittleren Juli-Temperaturen unter  $+10^{\circ}\text{C}$  konnten sich keine Waldgebiete mehr entwickeln: Die nicht von den Eismassen überdeckten Teile Deutschlands waren von Tundravegetation (Heidekraut und Moose, vereinzelt Zwergbirken) bestanden. Nur während des Oerel-Interstadial (57.700 bis 55.400 Jahre vor heute) trat eine geringfügige Erwärmung auf, so dass in der Tundra wieder Zwergsträucher wachsen konnten; in dieser Zeit bildeten sich auch ausgedehnte Hochmoore. Mit dem Beginn des folgenden Ebersdorf-Stadials breiteten sich jedoch wieder Grastundren und Kältesteppen aus. Die mittlere Januartemperatur erreichte in dieser Zeit nur noch  $-27^{\circ}\text{C}$  und sank im weiteren Verlauf der Weichsel-Kaltzeit weiter ab. Dies war auch die lang andauernde Zeit, in welcher sich in Mitteleuropa mächtiger Permafrost ausbildete, welcher bis 140 m tief in den Untergrund eindrang. Das grosse skandinavische Inlandeis drang weit nach Norddeutschland vor und erreichte in der Zeit von 22.000 bis 18.000 Jahren vor heute die Lüneburger Heide sowie das Gebiet nördlich der Elbe; ebenso drangen in Süddeutschland die Gletscher aus dem Alpenraum etwa bis auf die Höhe des heutigen München vor. Nordbayern lag in dieser Zeit zwischen den Alpengletschern im Süden und dem nördlichen Inlandeis. Abgesehen vielleicht von kleinen Firnflächen im Bayerischen Wald blieb dieses Gebiet jedoch stets gletscherfrei. Während der eigentlichen "Eiszeiten" erstreckten sich hier Tundren und Kältesteppen -- ähnlich dem heutigen Sibirien. Diese wurden während der gemässigten Perioden, der "Interstadiale", durch lockere Waldbestände wie in der Taiga oder durch Busch-Wald abgelöst; zunächst siedelten sich Birken und Hasel an und später Kiefern, welche in Perioden mit höheren Temperaturen durch Eichenmischwälder abgelöst wurden.



Während der Weichsel-Kaltzeit waren in den grossen Eismassen immense Wassermengen gebunden. Dies bedingte, dass der Wasserspiegel der Nordsee rund 130 m tiefer lag und die Meeresküste rund 600 km weiter im Norden verlief. Dorthin floss auch der "Ur-Rhein" und nahm die Weser und die Themse als Nebenflüsse auf.

Die eben genannten Rekonstruktionen der Vegetationsverhältnisse im "eiszeitlichen Europa" beruhen auf dem so genannten Pflanzen-Thermometer (vgl. BERNER & STREIF 2001). Dieses basiert auf Vergleichsuntersuchungen von typischen Pflanzengemeinschaften aus unserem Erdzeitalter in Relation zu den heutigen Witterungsverhältnissen im entsprechenden Gebiet.

Diesen Untersuchungen liegt typischerweise das Monatsmittel der Lufttemperatur im Juli zugrunde: Sie beträgt beispielsweise heute in Nordwestdeutschland rund  $+17,5^{\circ}\text{C}$ . Diese "mittlere Julitemperatur" beeinflusste in der geologischen Vergangenheit und Gegenwart massgeblich das Auftreten oder Fehlen von Wäldern:

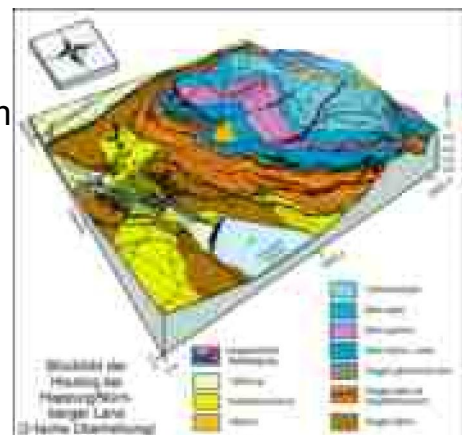
- Bei einer mittleren Julitemperatur von  $0^{\circ}\text{C}$  bis  $+5^{\circ}\text{C}$  existiert im Allgemeinen nur eine Polarwüsten-Vegetation.
- Bei einer mittleren Julitemperatur von  $+5^{\circ}\text{C}$  bis  $+10^{\circ}\text{C}$  tritt eine Tundren-Vegetation auf, welche sich bei rund  $+10^{\circ}\text{C}$  zur Strauch-Tundrenvegetation weiterentwickelt.
- Bei einer mittleren Julitemperatur von  $+10^{\circ}\text{C}$  bis  $+15^{\circ}\text{C}$  breiten sich kälteresistente Nadel- und Laubwälder aus.
- Bei einer mittleren Julitemperatur von  $+15^{\circ}\text{C}$  bis  $+20^{\circ}\text{C}$  treten wärmeliebende Laubwälder auf.
- Bei mittleren Julitemperaturen über  $+20^{\circ}\text{C}$  beginnen sich mediterrane Hartlaubwälder anzusiedeln.



Die letzten 15.000 Jahre, in welcher sich die menschliche Zivilisation entwickelte, waren eine Ausnahmeerscheinung in der jüngeren Klimageschichte unseres Planeten. Nie zuvor herrschten derart gleichmäßige Witterungsverhältnisse; diese Zeitspanne entspricht im Grunde einer Interglazialzeit. Der Klimaverlauf unserer jüngsten Vergangenheit vollzog sich lediglich mit größeren und kleineren Temperaturschwankungen, welche durch Klimaerwärmungen und -abkühlungen bedingt waren. Der Rückzug der Eiszeit-Gletscher und somit die Klimageschichte unseres heutigen Interglazials vollzogen sich nur mit größeren und kleineren Witterungsschwankungen.



Nach einem ersten schwachen Wärmeveränderung um 10.500 v. Chr. folgte als erster Klimaanstieg die *Alleröd-Zeit* von 10.000 bis 9.000 v. Chr. (+/- 200 a), in welcher die Juli-Mitteltemperaturen



etwa -4 K kühler als heute waren.

Während der *Jüngeren Dryas-Zeit* (9.000 bis 8.000 v. Chr.) war eine erneute Klimaverschlechterung zu verzeichnen: Die mittleren Lufttemperaturen lagen in Deutschland etwa -7 K bis -8 K unter den heutigen Klimawerten. Die wärmste Periode der jüngsten Klimageschichte war das sogenannte Klimaoptimum zwischen 7000 und 3000 v. Chr. Die Sommer waren damals auf den Kontinenten der Nordhalbkugel um einige Grad wärmer als heute. So zogen sich im wärmeren Präboreal (um 7.500 v. Chr.) die Inlandgletscher endgültig in das skandinavische Hochgebirge zurück. Von 5.000 bis 3.000 v. Chr. folgte das *Atlantikum*, in welchem eine feuchte und im Jahresmittel um +2° bis +3°C wärmere Witterung als heute vorherrschte. Etwa

ab der Bronzezeit erfolgte ein leichter Temperaturrückgang bis zu den heutigen Klimaverhältnissen, wobei um 2.300 v. Chr., 1.200 v. Chr. und 600 v. Chr. relativ trockene Klimaverhältnisse auftraten.

| Erdzeitalter            | Alter<br>(Jahre)             | stratigraphische<br>Gliederung in<br>Süd- bzw.<br>Norddeutschland | Zeitepoche<br>(Beginn v.<br>Chr.) | Kulturstufen             | Bevölkerung und<br>Kulturerscheinungen<br>in Europa                               |
|-------------------------|------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
|                         |                              |                                                                   | -100                              | jüngere<br>Latenezeit    | Oppida, hochentwickelte<br>Eisen-, Bronze- und<br>Keramik-Industrie der<br>Kelten |
|                         |                              |                                                                   | -450                              | ältere<br>Latenezeit     |                                                                                   |
|                         |                              |                                                                   | -750                              | Hallstattzeit            | Bronze- u. Eisenindustrie,<br>Häuptlingsburgen der<br>Kelten                      |
|                         |                              |                                                                   | -1.300                            | Urnenfelderzeit          | große Höhenfestungen,<br>Bronze- u.<br>Keramikproduktion                          |
|                         |                              |                                                                   | -1.800                            | Bronzezeit               | Hügelgräber, Bronzewaffen<br>u. -schmuck                                          |
|                         |                              |                                                                   | -2.500                            | späte<br>Jungsteinzeit   | Bau von Befestigungen,<br>geschliffene Steinwaffen                                |
|                         |                              |                                                                   | -5.500                            | frühe<br>Jungsteinzeit   | Dorfsiedlungen, Ackerbau<br>u. Viehzucht                                          |
| Quartär<br>(Holozän)    | -10.000                      | (Ende der Würm-Eiszeit)<br><br>Spätglazial                        | -9.700                            | Mittelsteinzeit          |                                                                                   |
|                         | -12.500<br>bis -<br>115.000  | Würm-Eiszeit<br>(=Weichsel-Eiszeit)                               | -40.000                           | jüngere<br>Altsteinzeit  | Auftreten des <i>Homo<br/>sapiens</i> in Europa                                   |
|                         | -115.000<br>bis -<br>126.000 | Eem-Warmzeit                                                      | -100.000                          | mittlere<br>Altsteinzeit | Auftreten des <i>Homo<br/>sapiens neanderthalensis</i> in<br>Europa               |
|                         | -130.000<br>bis -<br>230.000 | Riß-Eiszeit (=Saale-Eiszeit)                                      |                                   |                          |                                                                                   |
|                         | -325.000<br>bis -<br>340.000 | Holstein-Warmzeit                                                 |                                   |                          |                                                                                   |
| Quartär<br>(Pleistozän) | -370.000<br>bis -<br>475.000 | Mindel-Eiszeit<br>(=Elster-Eiszeit)                               | -500.000                          | ältere<br>Altsteinzeit   | erstes Auftreten von<br>Menschen in Europa ( <i>Homo<br/>erectus</i> )            |
|                         | -475.000<br>bis -<br>850.000 | Cromer-Komplex (Kaltzeiten und<br>Warmzeiten)                     |                                   |                          |                                                                                   |
|                         | -<br>1.200.000               | Günz-Eiszeit (=Weybourne-Kaltzeit)                                |                                   |                          |                                                                                   |
|                         | -<br>1.400.000               | Donau-Warmzeit                                                    |                                   |                          |                                                                                   |
|                         | -<br>1.600.000               | Donau-Kaltzeit (=Eburon-Kaltzeit)                                 |                                   |                          |                                                                                   |

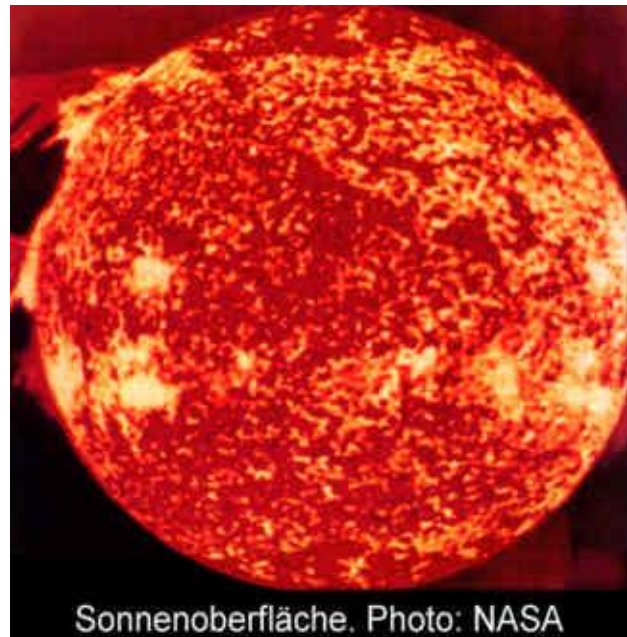
|                      |                |                                    |  |  |
|----------------------|----------------|------------------------------------|--|--|
|                      | -<br>1.900.000 | Biber-Warmzeit                     |  |  |
|                      | -<br>2.300.000 | Biber-Kaltzeit (=Brüggen-Kaltzeit) |  |  |
| Tertiär<br>(Pliozän) | -<br>2.400.000 | beginnende Klima-<br>Abkühlung     |  |  |

Auch nach der Zeitenwende lassen sich bis heute deutliche Klimaschwankungen erkennen: Von 500 bis 700 n. Chr. herrschte sehr trockenes Klima vor, während von 800 bis 1.200 n. Chr. eine sehr niederschlagsreiche und durch milde Winter gekennzeichnete Witterung verzeichnet wurde. Vom 15. bis zum Ende des 19. Jahrhunderts trat die "Kleine Eiszeit" auf, welche durch beachtliche Gletschervorstöße um 1650, um 1815 sowie um 1855 gekennzeichnet war; unterbrochen wurde sie von 1680 bis 1740 durch das sog. "Interglazial innerhalb der Kleinen Eiszeit", das durch trockene und milde Winter charakterisiert war. Ab dem Anfang unseres Jahrhunderts waren zunehmend milde Winter, verbunden mit einem Rückgang der Gletscher zu verzeichnen. In den Fünfziger Jahren konnten jedoch wieder Zuwächse und erneute Vorstöße der Gletscher beobachtet werden.

In der gegenwärtigen Epoche der Erdgeschichte, dem Quartär, spiegelte sich der charakteristische Wechsel von Warm- und Kaltzeiten in der Atmosphäre wieder. Die Kohlendioxid- und Methankonzentrationen der "fossilen Atmosphären" lassen sich anhand von im Polareis eingeschlossenen Luftbläschen rekonstruieren. Die atmosphärischen Kohlendioxid- und Methankonzentrationen waren während der Kaltzeiten niedrig; sie mögen zu den Klimaänderungen beigetragen haben, können aber nicht als Hauptagens angesehen werden.



Die **Hauptursachen** für die beträchtlichen **Klimaschwankungen** der jüngsten geologischen Vergangenheit waren jahreszeitliche und räumliche Variationen der eingestrahlten **Sonnenenergie**. Generell stammt die Energie für die beständigen Bewegungsabläufe in der Atmosphäre, für den unablässigen Kreislauf des Wassers in dieser, aber auch für das Werden und Vergehen des Lebens auf der Erde nahezu ausschließlich von der Sonne.

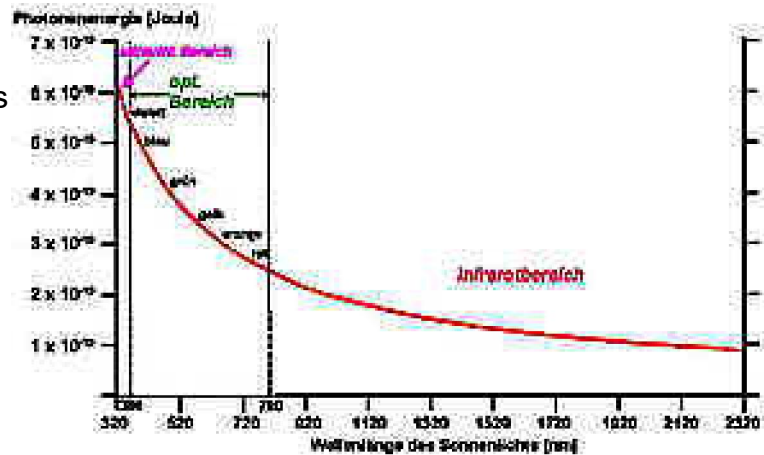


Vom physikalischen Standpunkt gesehen ist die **Sonne** eine autonome Energiequelle. Energielieferant ist die bei der sehr hohen Temperatur von 15.600.000 K im Innern der Sonne ablaufende Kernfusion. An der Sonnenoberfläche beträgt die Temperatur noch 5760 K. Bei diesen Hitzegraden liegen die Elemente in mehr oder weniger ionisierter, atomarer Form vor. Dies führt zu einer derart großen Anzahl von Absorptionslinien in der gasförmigen Sonnenhülle, daß die Sonne annähernd als schwarzer Strahler betrachtet werden darf (GOETZBERGER & WITTEWERT 1989). Die Sonne strahlt ihr Licht in isotroper Form ab, wobei die Intensität dieser Strahlung im Weltall nur durch die Temperatur der Sonnenhülle und den Abstand des Strahlungsempfängers von der Sonne bestimmt wird.

Das Sonnenlicht ist charakterisiert durch seine dualistische Natur. Die **Photonen** bzw. Lichtquanten weisen sowohl Wellen- als auch Korpuskelcharakter auf. Jeder Teilbereich des Sonnenlichtspektrums besitzt eine bestimmte Energie, welche von der Frequenz  $\nu$  abhängig ist. Die Frequenz  $\nu$  ist definiert durch den Ansatz:

$$\nu = \text{Lichtgeschwindigkeit} / \text{Wellenlänge des Sonnenlichts}$$

Die Lichtquanten besitzen eine bestimmte Energie, welche sich aus dem Produkt aus der Frequenz des entsprechenden Sonnenlichtspektrum x PLANCK'scher Konstante ergibt. Diese Photonenenergie E lässt sich somit nach folgenden Ansatz berechnen:



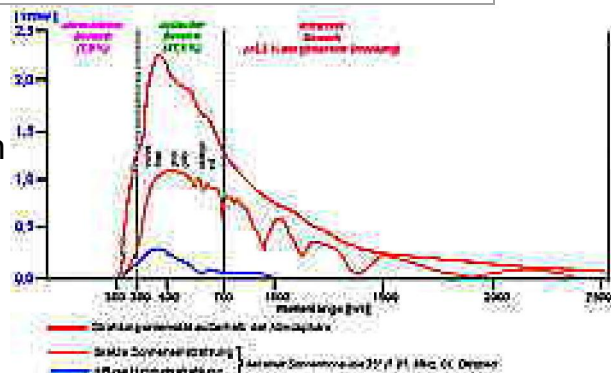
$$E = h \times n = h \times c / l$$

|                           |                                          |
|---------------------------|------------------------------------------|
| dabei sind:               |                                          |
| E = Photonenenergie       | [Joule]                                  |
| n = Frequenz              | [Hz]                                     |
| h = PLANCK'sche Konstante | [6,625 * 10 <sup>-34</sup> Joule x sec.] |
| c = Lichtgeschwindigkeit  | [3 * 10 <sup>8</sup> m/sec.]             |
| l = Wellenlänge           | [m]                                      |

Die **Energieverteilung der Sonneneinstrahlung an der Erdoberfläche** wird (nach GOETZBERGER & WITTEW 1989) prozentual wie folgt beschrieben :

|                                        |          |
|----------------------------------------|----------|
| Ultravioletter Bereich (200 - 380 nm): | ca. 3 %  |
| Optischer Bereich (380 - 780 nm):      | ca. 44 % |
| Infrarotbereich (780 -2400 nm):        | ca. 53 % |

Die **ultraviolette Strahlung** weist zwar in den einzelnen Spektralbereichen die höchsten Energiebeträge der Photonen auf; bedingt durch die Abschirmung durch die Erdatmosphäre und hier insbesondere die Ozonschicht dringt jedoch nur ein kleiner Teil der ultravioletten Strahlen bis zur Erdoberfläche vor.

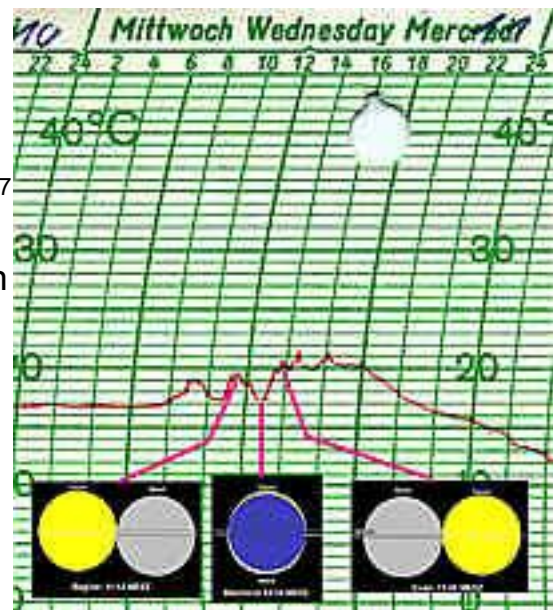


Die Strahlen der Wellenlängen von 380 - 780 nm transportieren nicht nur Wärmeenergie, sondern werden auch vom

menschlichen Auge als Licht wahrgenommen. Dieser **optische Bereich** umfaßt etwa die Hälfte der bis zum Erdboden vordringenden Strahlen. Unter Berücksichtigung der hohen Photonenenergie des sichtbaren Lichts zeigt sich, daß hier die größte Energiedichte des Sonnenlichts liegt.

Hingegen lassen sich die nicht sichtbaren **infraroten Strahlen** der Sonne nur durch ihre Wärmewirkung feststellen. Von der grünen Vegetation wird ein beträchtlicher Anteil der Infrarotstrahlung reflektiert oder durchgelassen. Nach V. EIMERN & HÄCKEL (1984) können nur wenige Prozent hiervon von den grünen Blättern absorbiert werden.

Die Sonne gibt (nach Berechnungen von KARAMANOLIS 1988) innerhalb eines Jahres die **Energiemenge** von  $3,72 \times 10^{26}$  Joule oder etwa  $10^7$  TWa ab. Lediglich ein Bruchteil hiervon (etwa 178 000 TWa) treffen pro Jahr auf die Erde. Die Schwankungsbreite der einfallenden Energiemenge, die sich aufgrund der elliptischen Bahn der Erde um die Sonne ergibt, liegt bei etwa 3,3 % .



Der Mittelwert der Strahlungsintensität, welcher an der Obergrenze der Atmosphäre senkrecht auf eine Fläche von  $1 \text{ cm}^2$  einfällt, wird als **Solarkonstante** bezeichnet. Sie beträgt an der äußeren Grenze zur Erdatmosphäre pro Minute etwa  $8 \text{ Joule/cm}^2$  oder  $1,4 \text{ kW/m}^2$ , bzw.  $33,6 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \times \text{d})$ .

Die letztgenannte Einheit repräsentiert nicht Leistungs-, sondern reine Energiewerte (in Wattstunden pro  $\text{m}^2$  und Tag). Eine Globalstrahlung von  $5000 \text{ Wh}/(\text{m}^2 \times \text{d})$  bedeutet, daß eine horizontale Fläche von  $1 \text{ m}^2$  während eines Tages eine Energiemenge von  $5 \text{ kWh}$  aus der Sonnenstrahlung aufnimmt. Der Begriff "Energie" wird, vor allem wenn es um Probleme der Wärmetechnik handelt, mit "Arbeit" gleichgesetzt und in Joule (J) gemessen. Hierbei gelten folgende Beziehungen:

|                              |                               |                                 |                                      |
|------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|
| $1 \text{ J} = 1 \text{ Ws}$ | $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$ | $1 \text{ Wh} = 3600 \text{ J}$ | $1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ Mio. J}$ |
|------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|

Zum Verständnis des Begriffs Kilowattstunde (kWh) sei als Beispiel angeführt, daß eine Glühlampe mit der Leistung von  $100 \text{ W}$  bei einem 24 stündigen Betrieb  $2400 \text{ Wh}$  ( $= 2,4 \text{ kWh}$ ) verbraucht.

Der **Mittelwert** der von der Sonne zugestrahlten Energie für die ganze Erde beträgt nach V. EIMERN & HÄCKEL (1984) an der Obergrenze der Atmosphäre  $8,38 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \times \text{d})$ .

Etwa ein Drittel der am Rand der Erdatmosphäre insgesamt eingestrahlten Sonnenenergie (ca. 53 000 TWh) werden in der Atmosphäre und an der Erdoberfläche reflektiert und in das Weltall zurückgestrahlt.

Von der gesamten Sonneneinstrahlung gelangen nur 31 % als direkter Sonnenschein bis zur Erdoberfläche.

17 % der einfallenden Strahlung, hierunter insbesondere der größte Anteil an ultravioletter Strahlung, werden bereits in der Atmosphäre absorbiert, weitere 24 % durch Wolken in den Weltraum reflektiert.

16 % der einfallenden Sonnenstrahlen gelangen durch die Wolken als diffuses Licht zur Erdoberfläche.

Ein Anteil von 12 % der Sonnenstrahlung wird auf dem Weg durch die Atmosphäre zu diffuser Himmelsstrahlung zerstreut, wobei etwa je die Hälfte in den Weltraum und zur Erdoberfläche gelangt.

Für den Wärmehaushalt der Atmosphäre und der Erdoberfläche ist die Summe aller obengenannten Strahlungsströme wichtig. Das Verhältnis zwischen kurzweiliger Sonnen- und Himmelsstrahlung sowie langweiliger Gegenstrahlung der Atmosphäre zu langweiliger Wärmeausstrahlung der Erdoberfläche ergibt die **Strahlungsbilanz**. Sie ändert sich im Tages- und im Jahresablauf sowie mit der geographischen Breite. Die Strahlungsbilanz ist während des Tages fast immer positiv, nachts jedoch immer negativ. Für die Erdoberfläche insgesamt beträgt sie nach V. EIMERN & HÄCKEL (1984) während eines Jahres durchschnittlich  $2,26 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \times \text{d})$ .

Von der bis zur Erdoberfläche vorgedrungenen Energiemenge werden rund 41 000 TWh für die **Verdunstung** vor allem des Meerwassers verbraucht und bedingen so die Niederschläge.

Die mit der Verdunstungswärme dem Boden, Wasser oder den Pflanzen entzogene und an die Luft abgegebene Energie wird unter dem Begriff "latenter" (= verborgener) Wärmestrom zusammengefaßt. Ein geringer Teil dieses latenten Wärmeübergangs fließt aber bei Luftfeuchten-Kondensation an der Erdoberfläche wieder an diese zurück.

Etwa 83000 TWa der Sonnenenergie werden nach KARAMANOLIS (1988) für die **Erwärmung** der **Luft** und der **Ozeane** verbraucht.

Ein kleiner Teil der Sonnenenergie in Höhe von 370 TWa ist für die Entstehung von **Luftströmungen** und **Meereswellen** verantwortlich.

Etwa 100 TWa entfallen auf die **Photosynthese** der Pflanzen auf der Erde.

Von der Erde selbst werden in Form der aus dem Erdinnern abgestrahlten **Erdwärme** 35 TWa sowie 3 TWa, welche als die von den Gezeiten erzeugten Reibungsenergie bereitgestellt werden, abgegeben.

Weiterhin erfolgt von der Erdoberfläche die **langwellige Wärmeabstrahlung** der empfangenen Sonnenenergie. Alle Körper, so auch die Boden-, Wasser- oder Pflanzenoberflächen geben eine ihrer Temperatur entsprechende Wärmestrahlung ab, welche sich nur durch die Wellenlänge von der Sonnenstrahlung unterscheidet. Diese Energie geht -- je nach den Temperaturunterschieden -- als fühlbarer Wärmestrom vom Boden oder Wasser in die Atmosphäre oder von dieser an die Erdoberfläche zurück. Bei den auf der Erdoberfläche vorherrschenden Temperaturen liegen diese Wellenlängen im allgemeinen zwischen 6000 nm und 60000 nm. Auf diesen Wellenlängen erfolgt der Energieaustausch zwischen Erdoberfläche, Atmosphäre und Weltraum, welcher n. GOETZBERGER & WITTWER (1989) größenordnungsmäßig

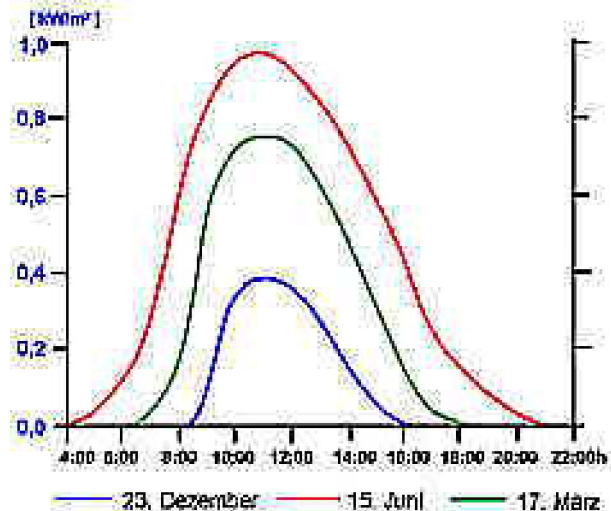


dem Energieumsatz im Spektralbereich der Sonnenstrahlung gleichkommt.

Die zum Erdboden gelangende direkte Sonnenstrahlung, die diffuse Himmelsstrahlung und die an den Wolken zum Erdboden reflektierte Sonnenstrahlung werden als **Globalstrahlung**

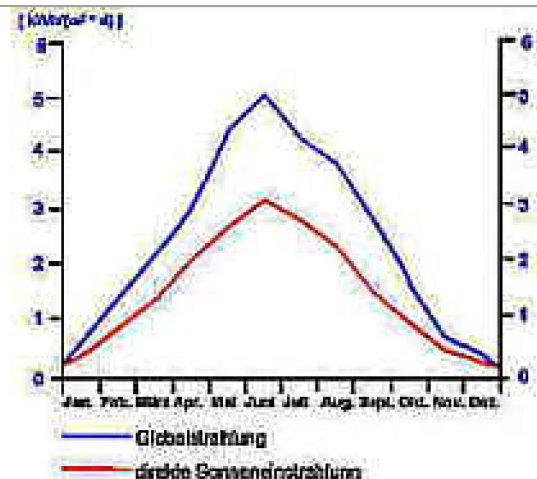
zusammengefaßt und in Watt (W) gemessen. Die Globalstrahlung wurde definiert als die gesamte auf eine

horizontale Fläche auftreffende Sonnenenergie. Für die Bundesrepublik Deutschland gab HASCHER (1987) die folgenden, maximal möglichen Werte für die auf einen Quadratmeter pro Stunde einfallende Globalstrahlung an:

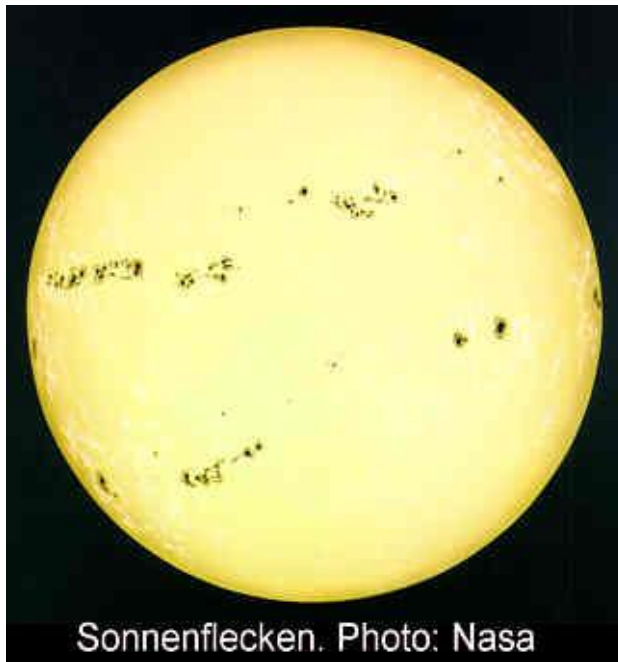


|                                                   | Sommermonate | Wintermonate |
|---------------------------------------------------|--------------|--------------|
| Sonnenschein, klarer bis leicht diffuser Himmel   | 600 - 1000 W | 300 - 500 W  |
| Sonnenschein bei leichter bis mittlerer Bewölkung | 300 - 600 W  | 150 - 300 W  |
| stark bewölkt bis neblig                          | 100 - 300 W  | 50 - 150 W   |

Der Anteil der diffusen Strahlung beträgt nach KARAMANOLIS (1988) in den Sommermonaten etwa 50 % der Globalstrahlung. Beispielsweise beträgt im Juni die mittlere Globalstrahlung 5500 Wh/(m² x d), wobei auf die diffuse Strahlung 2800 Wh/(m² x d) entfallen. Während der Wintermonate kann der Anteil der diffusen Strahlung fast 100 % der Globalstrahlung betragen.



Die von der **Sonne abgegebene Strahlungsenergie** ist jedoch nicht völlig konstant: Diese Veränderungen variieren zyklisch im Minutenbereich, können – im verstärkten Maße -- auch Jahrzehnte bis Jahrtausende andauern.



Sonnenflecken. Photo: Nasa

### Die **Sonnenatmosphäre**

besteht aus drei Schichten: Die unterste Schicht stellt die Photosphäre dar; über ihr folgt die rund 10.000 km hohe Chronosphäre und über dieser die Korona, welche weit in den interplanetaren Raum hineinreicht.

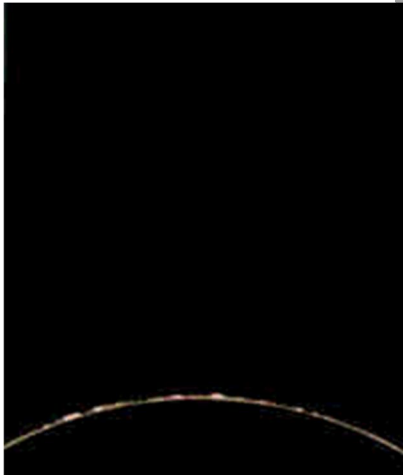
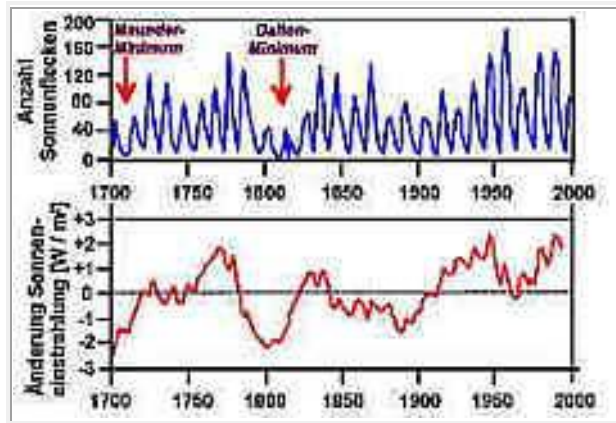
In den aktiven Zonen der etwa 300 km mächtigen Photosphäre kommt es zu einer Reihe von Veränderungen, die zusammenfassend als Sonnenaktivität bezeichnet

wird. Die auffälligsten Erscheinungen dieser Aktivität sind die Sonnenflecken: Es sind dies Regionen mit einer um etwa 1500 Kelvin geringeren Temperatur als die umgebende, rund 5800 K heiße Photosphäre.

Die **Sonnenflecken** sind das sichtbarste Merkmal unserer **veränderlichen Sonne**. Sie treten meist in Gruppen auf; ihre Häufigkeit variiert in den zwischen acht und fünfzehn Jahren andauernden, im Mittel elfjährigen Sonnenflecken-Zyklen ("SCHWABE-Zyklus").

Die Beobachtung der Sonnenfleckenaktivitäten geht bis in das Jahr 1610 zurück. Aus diesen Beobachtungen und anderen, teils indirekten Bestimmungen sind weiterhin der – den "SCHWABE-Zyklus" überlagernde -- "GLEISSBERG-Zyklus" mit 90 bis 120 Jahren sowie ein weiterer Zyklus mit 208 Jahren bekannt.

Der britische Astronom Edward W. MAUNDER untersuchte 1890 die historisch belegten Sonnenfleckenzyklen und wies auf eine Unterbrechung in den elfjährigen "SCHWABE-Zyklen" zwischen 1645 und 1715 hin: In diesen 70-jährigen Zeitraum ging die Anzahl der Sonnenflecken sehr stark zurück ("MAUNDER-Minimum").



In den Perioden der **Sonnenfleckenmaxima** weist die Sonne eine erhöhte Energieabstrahlung auf. Dies ist bedingt durch das Zusammenspiel der Sonnenflecken mit den sogenannten Sonnenfackeln. Unsere Sonne weist verschiedene Typen von Ausbrüchen auf, welche generell unter dem Begriff "Protuberanzen" zusammengefaßt werden. Die Sonnenfackeln stellen Eruptionen auf der Sonnenoberfläche dar, wobei in

wenigen Minuten solare Materie auf mehrere Millionen Grad erhitzt wird; sie können innerhalb weniger Stunden eine Höhe bis 600.000 km über der Sonnenoberfläche erreichen. Oft bilden sie ganze Fackelgebiete, besonders in der Umgebung der Sonnenflecken.

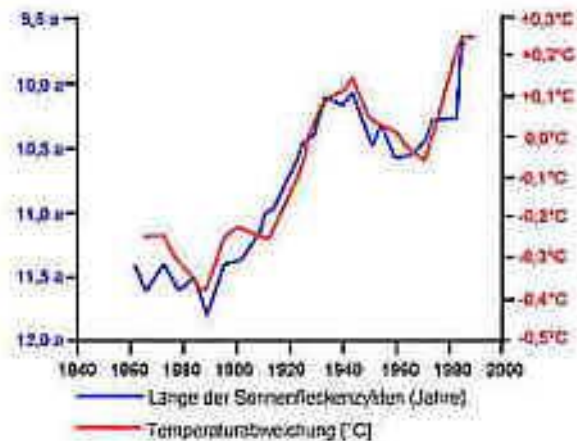
Bei den Ausbrüchen wird annähernd soviel Energie freigesetzt wie bei der Explosion von einer Milliarde Megatonnen TNT. Diese Energie wird in Form harter elektromagnetischer Strahlung im Gamma- und Röntgenbereich freigesetzt, weiterhin werden Protonen und Elektronen abgegeben, die in ca. acht Minuten die Erde erreichen.

Während die Sonnenflecken die Strahlung etwas verringern, erhöhen die Sonnenfackeln die abgegebene Strahlungsenergie im beträchtlichen Maße. So war während der Sonnenfleckenmaxima in den Jahren 1980 und 1990 eine um ca.  $1,3 \text{ W/m}^2$  erhöhte Sonneneinstrahlung im Vergleich zu den Sonnenfleckenminima in den Jahren 1986 und 1996 zu beobachten.

Auch die **Länge der Sonnenfleckenzyklen** weist einen auffälligen Bezug zu den beobachteten

Temperaturänderungen auf der Erde auf. Mittlerweile wird die Hypothese diskutiert, daß zwischen dem Sonnenwind, dem Erdmagnetfeld und den Wolkenbildungen in unserer Atmosphäre enge

Wechselwirkungen bestehen, die über variierende Bewölkungsgrade zu unterschiedlichen Rückstrahlungskoeffizienten der Sonnenenergie führen und somit signifikante Temperaturveränderungen bedingen. So zeigt für den Zeitraum 1860 bis 1980 die Länge der Sonnenfleckenzyklen eine signifikante Übereinstimmung mit den Temperaturabweichungen.



In der geologischen Vergangenheit bedingten die **unterschiedlichen Intensitäten der Globalstrahlung** eine Zu- oder Abnahme der Lufttemperaturen, hierdurch implizit die Vorstöße und Rückzüge der Gletscher, die Veränderungen der Meeresströmungen und der atmosphärischen Zirkulationen sowie der Niederschläge, aus denen wiederum entscheidende Effekte auf die Biosphäre resultierten.

Das Verständnis für natürliche Klimaschwankungen wie für anthropogene "Treibhauseffekte" sollte als Basis für politische Entscheidungen dienen. Aber: Klimaveränderungen werden durch viele Parameter verursacht. Der **wichtigste Faktor** ist der **Wasserdampfgehalt** unserer Atmosphäre, der in erster Linie zur Erwärmung der Erde beiträgt und letztlich die Durchschnittstemperatur der Erde von +15°C bedingt. Auch verändert sich der **Reflexionskoeffizient** unserer Erde -- die Albedo -- je nach Bewölkungsgrad und Beschaffenheit der Erdoberfläche.

Weitere Klima-Faktoren sind die Art und Verteilung der **Niederschläge** sowie die Luft- und Meeresströmungen. Hinzu kommen natürliche wie von Menschen verursachte Einflüsse. Dazu gehören die astronomischen Verhältnissen der Erde (Erdbahn, Neigung der Erdachse) ebenso wie die natürlichen **Schwankungen der Sonneneinstrahlung**, die **industriellen Emmisionen** sowie die **vulkanischen Stäube** und Exhalationen. So wirken sich Vulkanaktivitäten sehr stark auf

das Weltklima aus. Wenn bei starken Vulkanausbrüchen die in die Atmosphäre geschleuderte Materie und die Gase bis in die Stratosphäre gelangen, erhöhen sie dort die natürliche "Aerosolschicht": Diese Aerosole beeinflussen den Strahlungshaushalt: Ihre starke Zunahme bedingt eine Abkühlung in der Troposphäre und eine Erwärmung in der Stratosphäre. Diese mehrjährigen Stratosphärenenerwärmungen (um max. 5 K) wurden für die untere Stratosphäre z.B. nach den Vulkanausbrüchen des Mount Agung/Bali (1963) und des El Chichon/Mexiko (1982) nachgewiesen. Die längerfristigen Folgen vulkanischer Aktivitäten lassen sich nur schwer beurteilen. Selbst wenn die vulkanischen Aerosole innerhalb einiger Jahre wieder aus der Stratosphäre ausfallen, wäre es denkbar, daß sich der von ihnen verursachte Abkühlungseffekt über die thermisch trägen Ozeane noch geraume Zeit fortsetzt und so längerfristige Klimaänderungen bedingt.



Von den wichtigen **Rückkopplungsmechanismen**, zu denen der Albedoeffekt und die Änderungen des atmosphärischen Wasserdampfgehaltes gehören, stellt die Wolkenbildung und -verteilung eine der größten Unsicherheitsfaktoren dar. Wolken können sowohl erwärmende als auch abkühlende Wirkung hervorrufen. Der durch die Vegetation in die Atmosphäre abgegebene Wasserdampf hat zwar eine relativ kurze Verweilzeit in der Troposphäre, bedingt jedoch riesige Menge an atmosphärischen Wasserdampf. Auch zählt der von Flugzeugen emittierte Wasserdampf zu den wichtigen klimarelevanten Spurengasen.



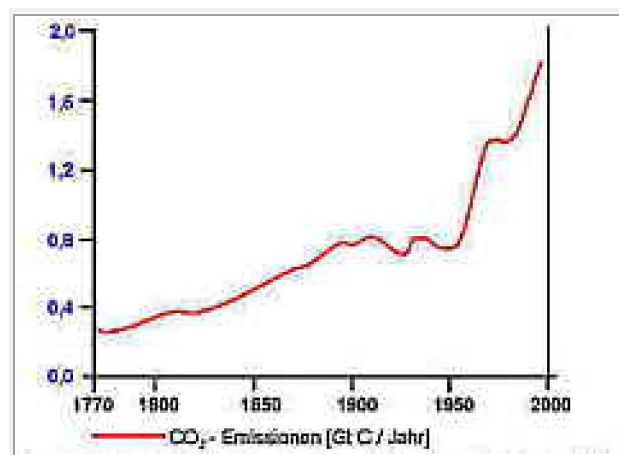


Allein über dem Gebiet der "Alten Bundesrepublik" betrugen 1983 die durch Flugzeuge bedingten Wasserdampfemissionen insgesamt 3,4 Mio. Tonnen. Der durch Flugzeuge emittierte Wasserdampf ist zwar im Vergleich zu der Gesamtmenge des troposphärischen Wassers nur eine winzige Menge. Im Bereich der Troposphäre und unteren Stratosphäre entstehen hieraus jedoch sofort winzige Eiskristalle; diese formen sich zu Kondensstreifen, aus welchen sich Eiswolken (sog. Cirren) bilden können. Diese Cirruswolken tragen beträchtlich zum Treibhauseffekt bei, da sie die Sonneneinstrahlung nahezu ungehindert zum Erdboden durchlassen, die von der Erde abgestrahlte Wärmestrahlung jedoch sehr effektiv absorbieren. So ergibt sich bei einer nur zweiprozentigen Erhöhung des Bedeckungsgrades durch Cirruswolken eine Erhöhung der Globaltemperatur um  $+1^{\circ}\text{C}$ .

Nach den bislang vorliegenden Meßreihen stiegen seit dem Ende des letzten Jahrhunderts die global gemittelten Lufttemperaturen um  $+0,3\text{ K}$  bis  $+0,6\text{ K}$  an. Da jedoch die moderne Klimaforschung nur etwa die letzten 30 Jahre umfasst, sind ältere Meßreihen nur mit sehr kritischer Distanz verwendbar. Auch ist zu berücksichtigen, daß durch das Wachstum der Städte, der großflächigen Rodung von Wäldern und der Ausdehnung landwirtschaftlicher Produktionsflächen weiträumig "**Wärmeinseln**" geschaffen wurden, in deren Nähe die Meßstationen heute deutlich höhere Lufttemperaturen registrieren.



Bereits aus den wenigen, oben erläuterten Klimafaktoren wird die Komplexität von Wettersimulationen und -extrapolationen in die Zukunft deutlich. Ein Computermodell, das in der Lage wäre, das heutige und künftige Klima auch nur mit hinreichender Verlässlichkeit zu simulieren, ist aufgrund unseres fehlenden Wissens und der noch mangelhaften Rechnerkapazität leider nicht verfügbar. Auch wurde in der bisherigen Klimadiskussion für den langfristigen Zuwachs des atmosphärischen Kohlendioxidgehaltes die immer stärker zunehmende Verbrennung fossiler Brennstoffe verantwortlich gemacht. Neuere Untersuchungen lassen jedoch bezweifeln, daß hier die einzige Ursache liegt. So wird Kohlendioxid aus der **Biomasse** im beträchtlichen Umfang durch das Abbrennen oder die Rodung großer Waldflächen und die darauf folgende Oxidation der Humusschicht freigesetzt.



Die Atmosphäre enthält gegenwärtig in Form von Kohlendioxid etwa 700 Milliarden Tonnen Kohlenstoff. In der gesamten Biomasse der Erde sind rund 800 Milliarden Tonnen Kohlenstoff gespeichert. Ein **noch größeres Reservoir** bildet die organische Materie des Erdbodens wie Humus und Torf: Ihr

Kohlenstoffinhalt wird auf 1000 bis 3000 Milliarden Tonnen geschätzt.

Im Jahresrhythmus des atmosphärischen Kohlendioxidgehaltes spiegelt sich der **Stoffwechsel** von Fauna und Flora wieder. Die jahreszeitlichen Schwankungen des CO<sub>2</sub>-Gehaltes korrelieren mit der wechselnden Intensität der Photosynthese. Dieser Rhythmus wird vor allem von den Wäldern verursacht, deren Photosyntheseleistung die jeder anderen Vegetationart beträchtlich übertrifft. Wälder können Kohlenstoff in derart großen Mengen speichern, daß sich dies auf den Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre spürbar auswirkt.

In welcher Größenordnung der CO<sub>2</sub>-Gasaustausch heute abläuft, sollen einige Zahlen aufzeigen: Beispielsweise verbraucht ein Quadratkilometer Buchenwald pro Jahr etwa 1.100.000 kg Kohlendioxid und bildet hieraus 670.000 bis 680.000 kg organische Substanz.

Auf 10.000 Liter Luft kommen etwa 3 Liter Kohlendioxid, welche 5,91 Gramm Kohlendioxid bzw. 1,6 Gramm Kohlenstoff enthalten. Nun sind in einem Baum von 5.000 kg Trockengewicht etwa 2.500 kg Kohlenstoff angesammelt. Um diese zu erlangen, muß also ein Baum aus 15,6 Millionen m<sup>3</sup> Luft das Kohlendioxid entnehmen. Der CO<sub>2</sub>-Bedarf für einen großen Buchenwald bewegt sich also bereits in Dimensionen, die jenseits der menschlichen Vorstellungskraft liegen.

Insgesamt wird geschätzt, daß die Vegetation der Erde jährlich etwa ein Zehntel des Totalbestandes an Kohlendioxid umsetzt. So enthalten die tropischen Regenwälder etwa 42 % des in der terrestrischen Vegetation gespeicherten Kohlenstoffs. Alle Waldgebiete der tropischen, gemäßigten und borealen Zone machen zusammen 90 % des Kohlenstoffs der Vegetation aus. Hingegen enthält die gesamte Landwirtschaft der Erde weniger als 1 % des gespeicherten Kohlenstoffes.

Die **Rodung** von Wäldern, die **Trockenlegung** von Sümpfen und Mooren sowie die Ausdehnung von **Landwirtschaftsflächen** auf kohlenstoffreiche Böden beschleunigt den Zerfall von Humus, welcher dabei in Kohlendioxid und Wasser übergeht. Vor allem die in Mooren massenhaft vorkommenden **Torfmoose** speichern Kohlendioxid in sehr großen Mengen. Ihre größte Artenvielfalt weisen die Torfmoose ("Sphagnen") in den borealen Gebieten der Nordhalbkugel auf und bedecken große Gebiete im Norden Eurasiens und Nordamerikas. Hier bauten sie -- während der vergangenen Jahrtausende -- in den Mooren riesige Mengen an Phytomasse auf: Die von Torfmoosen bedeckte Fläche

beträgt nach den Berechnungen von FRAHM (2001) rund 1 % der Erdoberfläche. Aufgrund ihrer viel größeren Flächenausdehnung übersteigt die rezent noch vorhandene Phytomasse der Torfmoose selbst die heutige Pflanzenmasse der tropischen Regenwälder. Dies ist dadurch bedingt, daß die Torfmoose an den Stämmchenspitzen permanent bis 1 cm/a wachsen und die unteren Moospartien zwar absterben, im sauren Wassermilieu der Moore jedoch nicht zersetzt werden: Hierdurch bilden sich riesige Torflager, die weltweit den größten oberirdischen Gesamt-Kohlenstoffspeicher darstellen: FRAHM (2001) schätzt die weltweit vorhandenen Mengen an Torf sogar auf 400 Gigatonnen. Bei der Entwässerung und Kultivierung der Moore kommt es zur Zersetzung der Torfe und somit zur riesigen Freisetzung von Kohlendioxid und Methan.

Bereits in der Zeit zwischen 900 n. Chr. und 1900 n. Chr. nahmen die Waldflächen Europas -- ähnlich wie in früherer Zeit in den Mittelmeerländern -- von 90 % auf etwa 20 % ab. Durch diese Verringerung der Waldbestände wurde eine beachtliche Kohlenstoffmenge freigesetzt. Die heute zu beobachtende rapide Zerstörung der Wälder führt der Atmosphäre Kohlendioxid in einer Menge zu, welche der Freisetzung von CO<sub>2</sub> durch Verbrennung fossiler Rohstoffe nahezu gleichkommt.



Aus dieser globalen Veränderung der Vegetationsverhältnisse resultiert noch eine weitere Problematik: Durch die immense Rodung der Wälder in der tropischen, gemäßigten und borealen Zone wurde und wird auch die **Verdunstung** und

somit der Wasser- und Wärmehaushalt der betreffenden Gebiete entscheidend verändert. Bäume entziehen über ihre Wurzeln dem Untergrund sehr große Wassermengen und geben es über die Spaltöffnungen (Stomata) ihrer Blätter in die Atmosphäre ab. Dieser als "Evapotranspiration" bekannte Vorgang verbraucht sehr viel Sonnenenergie, welche nach einer Rodung der Wälder den Boden aufheizt (die reine Bodenverdunstung ist wesentlich geringer und somit weniger energieaufwendig als die Verdunstung der hierauf stehenden Bäume).

Der beträchtliche Wasserumsatz aufgrund der pflanzlichen Transpiration wird durch folgende Werte verdeutlicht: So gibt beispielsweise eine mannshohe Sonnenblume pro Tag über 1 Liter Wasser an die Atmosphäre ab. Bei gutem Grundwasseranschluß kann in einem trockenheißen Sommer eine große Birke zwischen 400 und 700 Liter pro Tag verdunsten und eine 100-jährige Buche sogar 9000 Liter pro Tag. Ein Quadratkilometer Buchenhochwald verdunstet im Sommer jeden Tag etwa 2.000.000 Liter und im gesamten Jahr etwa 360.000.000 Liter. Umgerechnet auf je 100 g Blatt-Trockenmasse benötigt pro Vegetationsperiode eine Tanne 7 Liter Wasser, eine Buche jedoch 74 Liter. Aus den eben genannten Zahlen wird ersichtlich, welche entscheidende Bedeutung die Wälder und hier v.a. die Laubwälder für die Erhaltung eines eingespielten Klimaablaufes besitzen.

Größere Waldbestände, auch pflanzenbestandene Moore und Sumpfgebiete wirken ausgleichend auf die Temperaturen an der Erdoberfläche; bei einer Verringerung dieser Vegetationsflächen gestaltet sich das Witterungsgeschehen daher extremer.



Diese **Auswirkungen** bleiben nicht auf das Mikro- oder Regionalklima beschränkt. Eine reduzierte Verdunstung verringert auch die Intensität der Niederschläge und deren räumliche Verbreitung: Der natürliche

Wasserkreislauf geht

im allgemeinen so vor sich, daß die Niederschläge in erster Linie die obersten Bodenschichten und somit auch die Pflanzen



nähren. Jeder kräftige Niederschlag schickt außerdem eine größere Wassermenge in die Tiefe, aus der sich dann die Grundwassermenge erneuert. Dieses örtlich neugebildete Grundwasser erscheint so als Überschuß der kräftigen Regen sowie der Niederschläge in den Zeiträumen, in welchen die Pflanzen infolge der Winterruhe wenig Wasser für sich beanspruchen.

Die Wassermenge, die durch Niederschlag dem Boden zugeführt, aber nicht durch Verdunstung entfernt wird, wird durch Abfluß oder

Versickerung fortgeführt und speist die Flüsse oder erhöht den Grundwasserstand. Im Rahmen der Wasserhaushaltsgleichung wird eine Verdunstungs-Erhöhung zum einen Teil dem Abfluß entnommen, kommt zum anderen jedoch -- durch den inneren Kreislauf des Wasserdampfes in der Atmosphäre -- wieder den Niederschlägen zugute: "Was mehr verdunstet wird, wird auch mehr kondensiert".



Eine **Abnahme des Abflusses** kommt naturgemäß in einer Steigerung der Niederschlagsmenge wieder zum Vorschein. Da jedoch -- vor allem in den sechziger und siebziger Jahren unseres Jahrhunderts -- die Mehrzahl der Oberflächengewässer in der Bundesrepublik Deutschland und in Europa durch **Begradigung** der Fließgewässer, **Verringerung** der Anzahl von **Stillgewässern** und der großflächigen **Trockenlegung** von Feuchtgebieten eine beträchtliche Verringerung ihrer verdunstungsaktiven Oberflächen erfahren hat, musste sich demzufolge eine Verringerung der Gesamt-Luftfeuchten und somit der Niederschläge, ein Absinken der Grundwasserspiegel sowie eine beträchtliche Zunahme des oberirdischen Abflusses ergeben.

Hieraus resultierte zwangsläufig eine nachhaltige Störung bzw. ein zunehmend chaotisch reagierendes System des Wasserkreislaufes. Großflächige Rodungen und künstliche Absenkungen des Grundwasserspiegels bedingen eine mehr



oder minder stark ausgeprägte Versteppung der Landschaft:  
*"Der Mensch erschafft sich seine Wüsten selbst".*

Etwa die Hälfte der **Klimaerwärmung** ereignete sich im Zeitraum zwischen 1910 und 1940, als die Zunahme der Treibhausgase eine noch geringe Rolle spielte. Zwischen 1950 und 1975 fand sogar eine geringe Abkühlung statt. Diese historischen Temperaturreihen scheinen nicht mit der Treibhaus-Hypothese übereinzustimmen. Vor allem zwischen 1920 und 1940 erwärmte sich die Erdatmosphäre dafür zu schnell, und zwischen 1940 und 1970 kühlte sie sogar ab, obwohl die Konzentration der Treibhausgase rasch zunahm. Auch beim Vergleich der beiden Hemisphären ergeben sich Unstimmigkeiten. Aufgrund ihrer größeren Wasserfläche hätte sich die südliche Erdhalbkugel langsamer erwärmen sollen als die Nordhalbkugel, jedoch wurde das Gegenteil beobachtet.

Diese **Diskrepanz** wird von den hierbei beteiligten Wissenschaftlern dadurch zu erklären versucht, daß die schnelle Erwärmung zu Beginn unseres Jahrhunderts teilweise auf geringe Vulkantätigkeit und verstärkte Sonneneinstrahlung zurückzuführen sei. Die Abkühlung zwischen 1940 und 1970 wird so interpretiert, daß die natürlichen Klimaschwankungen in dieser Zeit den Treibhauseffekt überdeckten. Der Nobelpreisträger CRUTZEN bemerkt hierzu, daß das genaue Ausmaß der Erdatmosphären-Erwärmung ebenso unbekannt ist wie die räumliche Verteilung des Klimawandels.

# Klima schwankt

Das Klima verändert sich seit 3,5 Millionen Jahren ständig. Die erste Auswertung einer Erdböhrung in der Antarktis zeigt, dass Klimaschwankungen eher der Normalfall und nicht die Ausnahme sind. dpa

Die entscheidenden Fragestellungen sind, ob und wie sich das Klima in seinen zeitlichen und räumlichen Verlauf unter dem Einfluß einer zunehmenden Spurengaskonzentration entwickeln wird.

Obwohl der durch meteorologische Messungen belegte Zeitraum viel zu kurz ist, um Klimaschwankungen verschiedener Länge und Dauer richtig beurteilen zu können, prognostizieren heutige Computermodelle, daß durch "Treibhausgase" (v.a. CO<sub>2</sub>) in den kommenden 50 bis 75 Jahren eine durchschnittliche globale Erwärmung zwischen ein und vier Grad Celsius verursacht wird.

Die **Computersimulationen** bilden das natürliche, äußerst komplexe Geschehen in der Atmosphäre und den Ozeanen nur in stark vereinfachter Weise ab. Sie können deshalb nicht beweisen, ob und wie die Treibhausgase das zukünftige Klima markant verändern werden. Die Ursachen hierfür liegen u.a. in der noch nicht ausreichenden Kenntnis aller Klima-Unterkomponenten und derer Verknüpfungen sowie in der noch viel zu geringen Auflösung der Modelle.

Münchener Nachrichten Wochenendausgabe 20./21. Juli 2002

## In klirrender Kälte zu Hause

Polarforschungsinstitut AWI wird 25 Jahre alt

Von Ulrich Steinhilber

Die Antarktis ist ein Bereich des globalen Klimasystems, der sich seit 3,5 Millionen Jahren ständig verändert. Eine Auswertung einer Erdböhrung in der Antarktis zeigt, dass Klimaschwankungen eher der Normalfall und nicht die Ausnahme sind.

Am 15. Juli 1977 wurde das Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (AWI) in Bremerhaven gegründet. Ein Jahr später entstand das Zentrum für Polarforschung in Potsdam. Das AWI ist ein Zentrum der Forschung für die letzten und größten unentdeckten Räume der Erde.

In der Antarktis sind die letzten 3,5 Millionen Jahre des Klimasystems der Erde zu rekonstruieren. Die ersten Ergebnisse zeigen, dass das Klima in der Antarktis seit 3,5 Millionen Jahren in einem Rhythmus von 100.000 Jahren zwischen warmen und kalten Phasen schwankt.

Die Polarforschungsinstitute sind weltweit vernetzt. In der Antarktis sind die letzten 3,5 Millionen Jahre des Klimasystems der Erde zu rekonstruieren. Die ersten Ergebnisse zeigen, dass das Klima in der Antarktis seit 3,5 Millionen Jahren in einem Rhythmus von 100.000 Jahren zwischen warmen und kalten Phasen schwankt.

Das Zentrum für Polarforschung in Potsdam ist ein Zentrum der Forschung für die letzten und größten unentdeckten Räume der Erde. In der Antarktis sind die letzten 3,5 Millionen Jahre des Klimasystems der Erde zu rekonstruieren. Die ersten Ergebnisse zeigen, dass das Klima in der Antarktis seit 3,5 Millionen Jahren in einem Rhythmus von 100.000 Jahren zwischen warmen und kalten Phasen schwankt.

Bereits bei der Beschreibung des **aktuellen Zustandes der Atmosphäre** stellt die begrenzte Datenerfassung ein elementares Problem dar, welches trotz einiger 1000 Meßstationen auf dem Festland und dem Einsatz von Satelliten **noch unzureichend gelöst** ist.

Bekanntlich läßt sich das Wetter kaum für mehr als zehn Tage vorausbestimmen; längerfristige Prognosen sind bislang unmöglich. Weiterhin ist eine langfristige Bestimmung und Vorhersage der Sonnenaktivitäten, die einen maßgeblichen Einfluß auf das Witterungsgeschehen der Erde haben,

nicht möglich. Auch zeigen die seit 1979 durchgeführten Satellitenmessungen keine Tendenz einer globalen Erwärmung: Über der Arktis, wo nach den Klimamodellen die ersten Anzeichen einer Erwärmung sichtbar sein sollten, wurde in den vergangenen 17 Jahren sogar ein Abkühlungstrend beobachtet.

Diese **Imponderabilien** können nur durch eine wesentlich genauere Formulierung aller zugrundeliegenden physikalischen Prozesse, durch ein wesentlich dichteres Netz an Meßstationen und durch eine -- im Vergleich zu den heutigen Großrechnern -- wesentlich höhere Rechenleistung annäherungsweise überwunden werden. Die administrativen Bemühungen zur Reduzierung des anthropogen erzeugten CO<sub>2</sub> als alleinverantwortlichen "Klimakiller" mögen pekuniäre Hintergründe haben, dürften jedoch auf das von der Natur gestaltete, höchst komplexe Wettergeschehen wenig Einfluß haben.



---

### Literaturverzeichnis:

AABY, G.B. (1976): Cyclic palaeoclimatic variations and the Future.- Newsl. Stratigr. **5**, 1: 66-69, 2 figs., Berlin + Stuttgart 1976.

ALBRECHT, F. (1951): Die Methoden zur Bestimmung der Verdunstung der natürlichen Erdoberfläche.- Arch. Meteor., Geophys., Bioklim. (B) **2**, 1/2: 1-38, Wien 1951.

ARCHER, A., LÜTTIG, G. & SNEZHKO, I.I. (1987): Man's Dependence on the Earth.- 227 p., Stuttgart (Schweizerbart) 1987.

BAIER, A. (1992): Ein Beitrag zur Bestimmung der Wasserhaushaltsgröße Verdunstung aus hydrogeologischer Sicht.- Inaug.-Diss., 501 S., 194 Abb., 27 Tab., 24 Taf., Erlangen 1992.

--- (1997): Von Wolkenschichten, Wärmespeichern und Vulkanen.- Standpunkt **97**, 2: 39-42, Berlin + München 1997.

--- (1997): Einige Aspekte zur "Klimakatastrophe".- Klima 2000 - The Climate Debate **1997**, 5/6: 13-17, Thyrow 1997.

BAIER, A. & LÜTTIG, G. (1992-1996): Hydrogeologische Gutachten zur Wasserbilanz eines Telmaticums in Südhessen für den Zeitraum Nov. 1991 bis Okt. 2003.- zus. 17 Bände, Tab., Abb., Taf.; Erlangen (Selbstverlag).

--- (1996): Neue Ergebnisse zur Verdunstung von Baggerseen.- Schriften z. Fachtag. "Produktion v. Kies u. Sand 16.-17.01.1996": 77-90, 7 Abb., Aachen 1996.

--- (2000): Ergebnisse siebenjähriger Verdunstungsbeobachtungen an einem Baggersee in Südhessen.- Schriftenr. Umweltber. ISTE Baden-Württembg. **2** (2. erw. Aufl.): 197-223, 11 Abb., 5 Tab., Filderstadt (Müllerbader) 2000..

BARDINTZEFF, J.-M. (1999): Vulkanologie.- 280 S., Abb., Stuttgart (Enke) 1999.

BERNER, U. et al. (1995): Klimaänderungen in geologischer Zeit.- Z. Ang. Geol. **41**, 2: 69-82, Hannover 1995.

--- (1996): Aspekte der Klimaforschung -- Die Potentiale der BGR.- Unveröff. intern. Ber. BGR: 1-11, Hannover 1996.

[\[BERNER, U. & STREIF, H.J.\] \(2001\): Klimafakten - Der Rückblick, ein Schlüssel für die Zukunft, 238 S., 287 Abb., Stuttgart \(Schweizerbart\) 2001.](#)

CRUTZEN, P.J. (1996): Atmosphäre, Klima, Umwelt. (2. Aufl.).- Spektrum d. Wissensch., 227 S., Heidelberg (Spektrum) 1996.

DIETZE, P. (1995): Radikale CO<sub>2</sub>-Reduktionsforderung ungeprüft übernommen -- Zum Energiememorandum der DPG.- Fusion **16**, 4: 12-14, 1995.

--- (1998): Der Klima-Flop des IPCC.- Klima 2000 **1998**, 5-6: 24 - 35, Thyrow 1997.

EIMERN, J. VAN & HÄCKEL, J. (1984): Wetter- und Klimakunde.- 275 S., 106 Abb., 38 Tab., Stuttgart (Ulmer) 1984.

FRAHM, J.-P. (2001): Biologie der Moose.- 1. Aufl., 357 S., 128 Abb., Heidelberg & Berlin (Spectrum Akad. Verlag).

GAMBERT, M. & SUTER, J. (1982): Postglaziale Klimageschichte der Schweizer Alpen.- Geogr. helvet. **1982**, 2: 105-114, Zürich 1982.

GISLER, O. & SCHÜEPP, M. (1982): Die Bearbeitung alter Klimareihen.- Phys. Geogr. **1**: 9-24, Zürich 1982.

GOETZBERGER, A. & WITTEW, V. (1989): Sonnenenergie - Physikalische Grundlagen und thermische Anwendungen.- 218 S., 118 Abb., 29 Tab., Stuttgart (Teubner) 1989.

HASCHER, W. (1987): Solarenergie für jeden - Möglichkeiten und Grenzen.- 64 S., 29 Abb., 8 Tab., Hirschau (Techn. Lit.) 1987.

HEINTZ, A. & REINHARDT, G. (1991): Chemie und Umwelt.- 359 S., 106 Abb., 65 Tab., Braunschweig (Vieweg) 1991.

HOLZHAUSER, H. (1982): Neuzeitliche Gletscherschwankungen.- Geogr. helvet. **1982**, 2: 115-124, Zürich 1982.

KHALIL, M.A.K. (2000): Atmospheric Methane. Its Role in the Global Environment.- 352 pp., 61 figs., 49 Tabs., Berlin (Springer) 2000.

KARAMANOLIS, S. (1988): Das ABC der Sonnenenergie.- 123 S., 63 Abb., 6 Tab., Neubiberg (Elektra) 1988.

LAMB, H.H. & JOHNSON, A.I. (1959): Climatic variation and observed changes in the general circulation.- Geogr. Ann. **41**: 94-134, Stockholm 1959.

LANG, K.R. & WHITHHEY, Ch.A. (1993): Planeten -- Wanderer im All; 385 S., Berlin (Springer) 1993.

LÜTTIG, G. (1965): Interglacial and Interstadial Periods.- Journ. Geol. **73**, 4: 579-591, 4 Abb., Chicago 1959.



--- (1988): Gehen wir auf eine neue Eiszeit zu? - Eisz. & Gegenw. **38**: 6-16, 4 Abb., 4 Tab., Hannover 1988.

MÜLLER, H. (1979): Climatic changes during the last three interglacials.- Developm. atmosph. Sci. **10**: 29-41, Amsterdam 1979.

OESCHGER, H. MESSERLI, B. & SVILAR, M.J. (1980): Das Klima.- Berlin (Springer) 1980.

PANZRAM, H. (1975): Wann und wie endet die gegenwärtige Zwischeneiszeit? - Naturw. Rdsch. **28**, 3: 87-88, Stuttgart 1975.

RAST, H. (1987): Vulkane und Vulkanismus.- 236 S., 92 Abb., Stuttgart (Enke) 1987.

RIEDL, H. (1977): Untersuchungen zur witterungsklimatologischen Beziehung von Temperatur und Niederschlagsmessungen sowie zum kulturgeographischen Funktionswandel im Bereich der Alpinen Forschungsstation Samer Alm.- Sitz.-Ber. Österr. Akad. Wissensch., Mathem.-naturw. Kl., Abt. I, **186**, 1-3: 81-98, Wien (Springer) 1977.

RUDLOFF, H.v. (1967): Die Schwankungen und Pendelungen des Klimas in Europa seit dem Beginn der regelmäßigen Instrumenten-Beobachtungen.- 370 S., 89 Abb., Braunschweig (Vieweg) 1967.

RÜCKL, A. (1988): Bildatlas des Weltraums.- 231 S., Abb., Kte., Prag (Artia) 1988.

SCHÖNWIESE, Ch.-D. et al. (1993): Klimatrend-Atlas Europa 1891-1990.- Ber. Zentr. Umweltforsch. **20**: 1-218, Frankfurt (ZUF) 1993.

SCHWARZBACH, M. (1993): Das Klima der Vorzeit. Eine Einführung in die Paläoklimatologie.- 380 S., 191 Abb., 41 Tab., Stuttgart (Enke) 1993.

SCOTese, C. R. (2001): Atlas of Earth History **1**, Paleogeography.- PALEOMAP Project, 52 pp, Arlington, Texas 2001.

SCHULTE, U. (2003): Streit um heiße Luft. Die Kohlendioxid-Debatte.- 200 S., 8 Abb., Stuttgart (Hirzel) 2003.

SMIL, V. et al. (1987): Environmental Changes Arising from Resources Use - Group Report.- Resources and World Development: 524-531, Dahlem 1987.

[WARNECKE, G.] (1992): Tatort Erde -- Menschliche Eingriffe in Naturraum und Klima.- 299 S., 28 Tab., Berlin + Heidelberg (Springer) 1992.

WUNDT, W. (1953): Gewässerkunde.- 320 S., 185 Abb., Berlin (Springer) 1953.

WOLDSTEDT, P. (1962): Über die Gliederung des Quartärs und Pleistozäns.- Eisz. & Gegenw. **13**: 115-124, Öhringen/Württ. 1962.

--- (1966): Der Ablauf des Eiszeitalters.- Eisz. & Gegenw. **17**: 153-158, Öhringen/Württ. 1966.

ZAGWIJN, W.H. (1994): Reconstruction of climate change during the Holocene in western and central Europe based on pollen records of indicator species.- Veget. Hist. Archaeobot. **3**: 65-88, Berlin (Springer) 1994.

--- (1996): An analysis of eemian climate in western and central europe.- Quaternary Sci. Reviews **15**: 451-469, Haarlem 1996.

---

● **Some Links :**

- [Stellarium: ein kostenloses, quelloffenes Planetarium](#)
- [Celestia: A free real-time space simulation](#)
- [Unser Sonnensystem maßstabsgetreu](#)
- [Klimaschutz-Page des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt und Verbraucherschutz](#)
- [The Science & Environmental Policy Project](#)
- [The PALEOMAP-Project](#)
- [Physik-Links Peter Krahmer](#)



---

200409

**BACK**

[Zurück zur HomePage Dr. Alfons Baier](#)

\* Dr. Alfons Baier; last update: