



Klima

BAND 125



Ein  Buch

Klima

Von Prof. Dr. Werner Buggisch
und Christian Buggisch

Illustrationen von Eberhard Reimann



TESSLOFF

Vorwort

Kaum ein Tag vergeht, an dem in Zeitungen und Nachrichtensendungen nicht von Klima und Klimawandel die Rede ist. Warum ändert sich das Klima? Ist der Mensch am Klimawandel schuld? Und kann man etwas dagegen tun? Solche und ähnliche Fragen werden heute viel diskutiert.

Dieses WAS IST WAS-Buch möchte über den sogenannten anthropogenen – also vom Menschen verursachten – Klimawandel informieren, aber auch Grundlagen vermitteln und darstellen, welche naturgegebenen Kräfte das Klima auf der Erde beeinflussen.

Der Motor aller Klimaprozesse ist die Sonne. Stärke und Einfallswinkel der Sonnenstrahlen sowie die Rückstrahlung von der Erdoberfläche bestimmen unser Klima. Aber auch die Zusammensetzung der Atmosphäre spielt eine wichtige Rolle. Auf der Erde sorgen Wind und Wasser für eine

Umverteilung der von der Sonne gespendeten Wärme: Winde zwischen Festland und Ozeanen tauschen warme und kalte Luft aus, Meeresströmungen transportieren warmes und kaltes Wasser in weit entfernte Regionen. Dennoch lässt sich die Erde relativ gleichmäßig in Klimazonen unterteilen – eine tropische Zone nahe dem Äquator, eine polare Kaltzone und eine Zone mit gemäßigtem Klima, in der auch wir leben.

Klimaforscher interessieren sich zudem dafür, welches Klima vor Milliarden von Jahren auf der Erde geherrscht hat. Denn schon immer hat sich das Klima verändert. Warmzeiten wechselten sich mit Kälteperioden ab. Dies verraten uns Klimazeugen wie Fossilien und Gesteine. Je mehr wir die Klimaprozesse im Laufe der Erdgeschichte kennenlernen, desto besser verstehen wir, wie das Klima funktioniert und wie es sich verändern wird.



BAND 125

Die Schreibweise entspricht den Regeln der neuen Rechtschreibung.
Dieses Buch ist auf chlorfrei gebleichtem Papier gedruckt.

BILDQUELLENACHWEIS:

A1Pix, Taufkirchen: S. 14mr; Archiv des Autors: S. 16u, 17u (Eis/Pinguine), 18u (3), 19ul, 21ur, 26m (3), 27o (4), 28u, 30o (3), 31or (2), 39ur; Archiv Tessloff Verlag, Nürnberg: S. 7om, 13or, 14 (Hintergrund), 14ol, 15l (Hygrometer), 16o (Eisbär), 16mr (Wüste), 16m (Frosch), 16ur (Jaguar), 17ol (Wolf), 17or (Bär), 17m (Eichhörnchen/Fuchs/Löwen), 17ml (Giraffen/Elefanten), 48 (Hintergr.); Astrofoto, Sörlh: S. 4ol, 6ol, 6mr, 20ol; BARIGO GmbH, Villingen-Schwenningen: S. 14ml (Barometer); Bridgeman, Berlin: S. 36or; Corbis, Düsseldorf: S. 15l (Nebel/Reif), 17ur (Känguru), 28m (Schnecke); Focus, Hamburg: S. 3, 26l (Hintergr.), 27ul, 41ur, 44o; IFM – GEOMAR, Kiel: 4omr (Dr. Peter Linke); Institut für Meereskunde der Universität Hamburg: S. 4ur (Lars Kaleschke); Picture-Alliance, Frankfurt: S. 4or, 4ul, 5l, 5r, 6or, 6/7u, 7ol, 7or, 9m (2), 10ur, 12or, 13ur, 14or, 14ml, 15u, 16ol, 17 (Wald/Tropen/Rotkehlchen), 19ur, 21 (4), 22ul, 22mu, 23ol, 24u (2), 26ur, 27m, 32u, 34 (3), 35ol, 36ol, 37ol, 37om, 37u, 38 (4), 40o, 40ml, 40/41u, 41o, 44u, 45 (5), 47ul; Pixelio: S. 10ul, 27ur, 33mr, 44/45 (Hintergr.); Sammlung Gesellschaft für ökologische Forschung, München: S. 39ol, 39or (Greenpeace/Wolfgang Zängl); Senckenberg Museum, Frankfurt: S. 29ul; Wildlife, Hamburg: S. 16or (Eule), 16om (Luchs), 16mu (Borelle), 17o (Elch/Tundra), 17m (Skorpion/Viper), 19or, 20ul, 37or

UMSCHLAFOTOS: ARCHIV TESSLOFF VERLAG, NÜRNBERG (BODEN); FOCUS, HAMBURG (PALME/EIS); PICTURE-ALLIANCE, FRANKFURT (ERDE)

GESTALTUNG: JOHANNES BLENDINGER

ILLUSTRATIONEN: EBERHARD REIMANN

LEKTORAT: EVA DIX

Copyright © 2008 TESSLOFF VERLAG, Burgschmietstraße 2–4, 90419 Nürnberg

www.tessloff.com • www.wasistwas.de

Die Verbreitung dieses Buches oder von Teilen daraus durch Film, Funk oder Fernsehen, der Nachdruck, die fotomechanische Wiedergabe sowie die Einspeicherung in elektronische Systeme sind nur mit Genehmigung des Tessloff Verlages gestattet.

ISBN 978-3-7886-1512-3

Inhalt

Unser Klima im Wandel

Wie das Klima entsteht



Was ist die Antriebskraft des Klimas?

Beeinflusst auch die Erdoberfläche das Klima?

Wo entstehen Wetter und Klima?

Warum ist die

Atmosphäre für uns lebenswichtig?

Welche Rolle spielt das Wasser für unser Klima?

Was ist die Albedo?

Was versteht man unter dem „Treibhauseffekt“?

Wie kommt das Kohlendioxid in die Atmosphäre?

Was sind Kohlendioxid-Senken?

Kleines Wetter-Lexikon

Klimazonen und Wärmetransport



Welche Klimazonen gibt es auf der Erde?

Warum ist das Klima auf der Erde so unterschiedlich?

Wie entstehen die Jahreszeiten?

Was ist die globale Zirkulation?

Was geschieht in der tropischen Zelle?

Was geschieht in den beiden anderen Strömungszellen?

Wie entstehen Seewind und Landwind?

Wie entsteht das Monsun-Klima?

Was passiert am Rand von Gebirgen?

Was treibt die großen Ozeanströme an?

Was ist die „thermohaline Zirkulation“?

Klimazeugen der Erdgeschichte

Das Klima in der Erdgeschichte

Wie war das Klima in der Frühzeit der Erde?

Wann gab es die ersten Eiszeiten?

4 War die Erde schon einmal ganz von Eis bedeckt? 30

Wie konnte sich die Erde wieder vom Eis befreien? 30

6 Wie kam es zum Artensterben im Paläozoikum? 31

Wann entstanden die ersten Kohlelagerstätten? 31

6 Wie war das Klima zur Zeit der Dinosaurier? 32

Leben wir heute in einem Eiszeitalter? 33

7 Wie wirkten sich die Eiszeiten in unserem Raum aus? 33

Wie endete die letzte Vereisung? 34

Mensch und Klima



Kann der Mensch das Klima beeinflussen? 35

Warum steigt der Kohlendioxid-Anteil in der Luft? 36

Wie wirkt sich die Abholzung der Wälder auf das Klima aus? 37

Wie stark wird die Temperatur weltweit ansteigen? 37

Was passiert, wenn die Gletscher schmelzen? 38

Wird der Meeresspiegel ansteigen? 39

Warum ist die Entwicklung schwer vorherzusagen? 40

Wo wirkt sich der Klimawandel besonders stark aus? 40

Klimaschutz



Wie können wir das Klima schützen? 42

Welche Rolle spielen regenerative Energien? 43

Wie können wir Energie einsparen? 44

Erneuerbare Energien 44

26 Was ist das Kyoto-Protokoll? 46

Was tun Städte und Gemeinden für den Klimaschutz? 47

Welche Aufgabe hat der Weltklimarat? 47

Glossar, Index 48



Erde
durchlebt
wärmstes
Jahrzehnt



Unser Klima im Wandel

Forscher schlagen Alarm: Die Erde erlebt ihr wärmstes Jahrzehnt seit Beginn moderner Messungen um 1850. Immer häufiger sorgen extreme Wetterereignisse für Schlagzeilen.



Sommer 2003: Hitzewelle in Europa

In ganz Europa herrschen ungewöhnlich hohe Temperaturen. In Frankreich verdorrt die Ernte, in Spanien und Portugal richten Waldbrände großen Schaden an.

August 2005: Mega-Wirbelsturm

Hurrikan „Katrina“ fegt über den

Süden der USA hinweg und hinterlässt eine Spur der Verwüstung. Weit über 1000 Menschen kommen ums Leben, die Stadt New Orleans wird überflutet und in weiten Teilen zerstört.

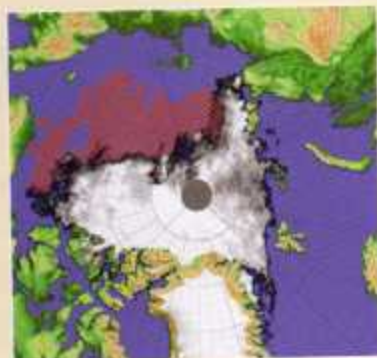
September 2007: Nordwestpassage eisfrei

Die arktische Durchfahrt vom Atlantik zum Pazifik ist erstmals seit Beginn der Satellitenbeobachtungen völlig eisfrei und damit für Schiffe befahrbar.

Weltweit wird die Klima-Erwärmung inzwischen als ernst zu nehmendes Problem betrachtet. Forscher warnen vor den Folgen des Klimawandels. Auf internatio-

August 2006, Serra Tomar: Erneut wüten Waldbrände im Zentrum Portugals. 450 Mann sind im Kampf gegen das Feuer im Einsatz.

nen Konferenzen versuchen Wissenschaftler und Politiker aus aller Welt, gemeinsame Schritte zum Schutz des Erdklimas einzuleiten. Ziel ist vor allem, den Ausstoß von Treibhausgasen zu verringern. Nach Meinung der Experten ist der erhöhte Gehalt von Gasen wie Kohlendioxid und Methan in der Atmosphäre für die Erwärmung der letzten Jahrzehnte verantwortlich. Umweltschützer kritisieren, dass bisher zu wenig konkrete Maßnahmen ergriffen wurden.



Der Rückgang des Arktis-Eises von Sommer 2006 (rot schraffiert) zu Sommer 2007

„Es ist kurz vor zwölf“

Fragen an einen Klimaforscher

Alle reden über den Klimawandel. Aber was ist das überhaupt: Klima?

„Klima“ ist im Prinzip dasselbe wie „Wetter“: „Wetter“ nennen wir den Zustand der Atmosphäre, zum Beispiel Temperatur, Wolken, Regen, Sonnenschein. Das Wetter beobachtet man aber über einen kurzen Zeitraum

hinweg, also über mehrere Tage. Das Klima beobachtet man dagegen langfristig, mindestens über Jahrzehnte.

Und was hat es nun mit dem Klimawandel auf sich?

Zunächst einmal: Dass sich das Klima ändert, ist ganz normal. Klimawandel hat es in der langen Geschichte der Erde immer wieder gegeben. Während der letzten Eiszeit vor 18 000 Jahren zum Beispiel war es auf der Erde so kalt, dass im heutigen Deutschland Eisbären lebten. Es gab aber auch Zeiten, in denen es viel wärmer war, etwa als die Dinosaurier unseren Planeten bevölkerten.

Heißt das, die aktuelle Diskussion über den Klimawandel ist ganz unnötig?

Leider nein. Denn normalerweise sind natürliche Ursachen wie etwa die Stärke der Sonnenstrahlung für einen Klimawandel verantwortlich, und meist ändert sich das Klima sehr langsam. In den letzten hundert Jahren – und das ist für Klimaforscher ein kurzer Zeitraum – beobachten wir aber einen ungewöhnlich starken Anstieg der globalen Temperatur. Und der größte Teil dieses Anstiegs dürfte von den Menschen verursacht sein.

Wie ist uns denn das gelungen?

Die Hauptursache ist, dass wir sehr viel Energie verbrauchen und dadurch immer mehr Treibhausgase in die Luft gelangen.

Also ist der Mensch schuld an Naturkatastrophen wie Hitzewellen und Hurrikanen?

Das kann man so nicht sagen. Sicher ist: Es wurde in den letzten Jahrzehnten immer wärmer, und

das hat vielfältige Auswirkungen auf Natur und Umwelt. Doch eindeutige Aussagen zu Ursache und Wirkung sind schwierig. Beispiel Hurrikane: Sie entstehen über dem Meerwasser bei bestimmten Temperaturen. Je höher die Temperatur des Wassers ist, desto mehr Energie beziehen die Hurrikane und desto mehr Kraft können sie entwickeln. Höhere Temperaturen führen also häufiger zu schweren

AUF EINEN BLICK



SO SCHÜTZEN WIR DAS KLIMA – DIE WICHTIGSTEN SCHRITTE

- **Treibhausgase verringern**
Der Ausstoß von Treibhausgasen muss weltweit deutlich herabgesetzt werden.
- **Energieverbrauch senken**
Durch neue Technologien und die Mithilfe jedes Einzelnen kann viel Energie eingespart werden.
- **Erneuerbare Energien nutzen**
Die Energie aus Sonne, Wind und Wasserkraft muss stärker nutzbar gemacht werden.
- **Die Wälder schützen**
Die weltweite Abholzung der Wälder muss eingedämmt werden.
- **Global handeln**
Alle Länder der Erde, Industriestaaten wie Entwicklungsländer, müssen zum Klimaschutz beitragen und in einem internationalen Klimaschutz-Abkommen konkrete Maßnahmen festlegen.



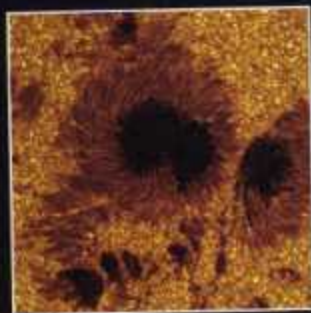
Die Elbe: Höchststand während der Flutkatastrophe 2002 – 9,40 m! Im Juli 2003 wird bei 88 cm die Güterschiffahrt eingestellt.

Wirbelstürmen. Dennoch kann man nicht sagen, dass ein bestimmter Hurrikan wie etwa „Katrina“ durch den Klimawandel verursacht wurde. Denn schreckliche Stürme gab es auch früher schon. **Können wir den Klimawandel noch verhindern?**

Das nicht, denn den hohen Ausstoß von Treibhausgasen in den letzten hundert Jahren können wir nicht rückgängig machen. Aber wir können versuchen, die Erwärmung durch wirksamen Klimaschutz so weit wie möglich zu begrenzen.



Auf der Oberfläche der Sonne lassen sich dunkle Flecken beobachten, deren Anzahl stark schwankt. Diese „Sonnenflecken“ sind etwas kühler als ihre Umgebung und strahlen daher weniger Licht ab.



Wie das Klima entsteht

Was ist die Antriebskraft des Klimas?

Ohne Sonne wäre es auf der Erde bitterkalt, und es gäbe kein Leben. Die Sonnenstrahlen sind unsere Licht- und Wärmequelle. Sie liefern die Energie für alle Klimaprozesse auf der Erde – und das, obwohl die Erde rund 150 Millionen Kilometer von der Sonne entfernt ist.

Im Gegensatz zur Erde, die einen Kern aus Eisen besitzt und im Wesentlichen aus Gestein besteht, ist die Sonne ein riesiger, unvorstellbar heißer Gasball. Dieser Gasball setzt sich vor allem aus den Gasen Wasserstoff und Helium zusammen. Noch an der Oberfläche der Sonne herrscht eine Temperatur von etwa 5 500 Grad Celsius. In ihrem Inneren herrschen unvorstellbar hohe Drücke und Temperaturen von nahezu 20 Millionen Grad Celsius. Unter diesen Bedingungen können Wasserstoffatome zu Helium verschmelzen und dabei gewaltige Energiemengen frei-

setzen. Die Sonne birgt in ihrem Inneren also eine Art riesigen Atomreaktor: Sie erzeugt durch Kernfusion so große Hitze, dass sie auch noch die viele Millionen Kilometer entfernte Erde damit wärmen kann.

Beeinflusst auch die Erdoberfläche das Klima?

Aus dem Weltraum sieht unsere Erde wie eine blaue Kugel aus. Das liegt an der Atmosphäre, der Lufthülle der Erde, die unseren Planeten wie ein dünner blauer Schleier umhüllt. Die Erdkugel selbst ist zu zwei Dritteln von Ozeanen bedeckt. Nur ein Drittel der Erdoberfläche wird von den Landmassen der Kontinente gebildet. Diese sind reich gegliedert. In den Hochgebirgen treten die Gesteine der Erdkruste zutage. Durch



Wettersatelliten, die in bis zu 36 000 Kilometern Höhe die Erde umkreisen, liefern den Menschen wichtige Informationen über die Entwicklung von Wetter und Klima.





Die Erdoberfläche mit Wäldern und Wasserflächen, Wüsten und Eisfeldern beeinflusst unser Klima.

SONNENFLECKEN

Die Sonnenstrahlung war in der Milliarden Jahre langen Geschichte der Sonne nicht immer gleich stark, sondern hat stetig zugenommen. Auch kurzfristig schwankt die Strahlkraft. Immer wieder beobachten die Astronomen auf der Oberfläche der Sonne dunkle Stellen – sogenannte Sonnenflecken. Die Menge der Sonnenflecken schwankt, wobei sie im Durchschnitt alle elf Jahre besonders zahlreich auftreten. Die Sonne ist dann besonders aktiv und strahlt stärker. Wie sehr die Sonnenflecken unser Klima beeinflussen, ist unter Forschern zurzeit noch umstritten.

Verwitterung entstehen aus den Gesteinen Böden, auf denen Pflanzen wachsen. Wälder, Wiesen und Ackerflächen, durchzogen von Flüssen und Seen, bedecken weite Gebiete der Erde. Wo das Wasser fehlt, sind Wüsten entstanden. An den Polen ist die Erde sehr unwirtlich: Große Eisflächen bedecken Land und Meer.

Die Lufthülle, die Verteilung von Ozeanen und Kontinenten, die Beschaffenheit der Erde und der Pflanzenwuchs bestimmen unser Klima. Pflanzen und Tiere haben sich an die unterschiedlichen Lebensbereiche angepasst und sind auf bestimmte Klimabedingungen angewiesen. Nur der Mensch besiedelt fast alle Regionen der Erde – und greift durch Landwirtschaft und Industrie zunehmend in das weltweite Klimageschehen ein.

Wo entstehen Wetter und Klima?

Bevor die Sonnenstrahlen auf die Erdoberfläche treffen, durchqueren sie die Atmosphäre – die Lufthülle der Erde. Die Atmosphäre reicht von den Festländern und Ozeanen bis hinauf in eine Höhe von rund 1000 Kilometern und lässt sich in verschiedene Schichten unterteilen: Die



unterste Schicht, die Troposphäre, reicht bis in eine Höhe von rund 7 Kilometern an den Polen und 17 Kilometern am Äquator. Darüber folgen Stratosphäre, Mesosphäre, Thermosphäre und Exosphäre. Bis hierhin ist die Anziehungskraft der Erde stark genug, die Luftteilchen an sich zu binden. Darüber entweichen sie in den Weltraum.

Für Wetter und Klima sind nur die untersten 50 Kilometer der Atmosphäre, also Troposphäre und Stratosphäre, von Bedeutung. Denn hier spielt sich das Wetter ab: Hier bilden sich Wolken und sorgen Luftströmungen rund um den Globus für einen weltweiten Temperatenausgleich.

Warum ist die Atmosphäre für uns lebenswichtig?

Die Lufthülle der Erde ermöglicht uns nicht nur das Atmen, sondern schützt uns auch vor der gefährlichen kurzwelligen Strahlung der Sonne. Die Sonne sendet ein weites Spektrum an Strahlen aus,

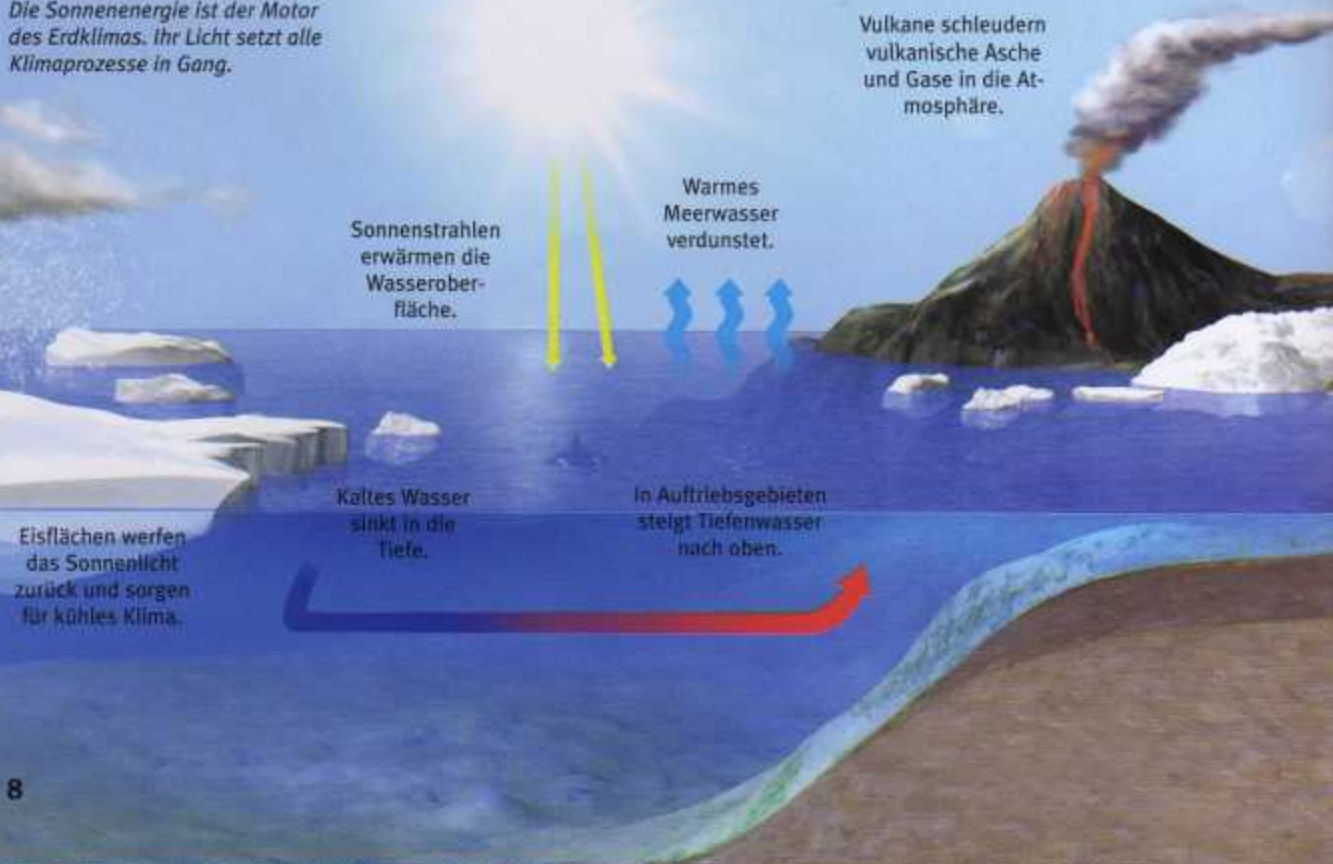
das vom kurzwelligen Ultraviolett (UV) über den sichtbaren Bereich bis zur infraroten Wärmestrahlung (IR) reicht. Kurzwellige Strahlung schadet dem Menschen: Wer sich zu lange einer starken UV-Strahlung aussetzt, kann Hautkrebs bekommen. Die Erde schützt uns durch ihre Atmosphäre: Das in der Stratosphäre enthaltene Ozon absorbiert die kurzwellige Strahlung der Sonne.

Luft ist ein Gasgemisch und besteht zu 78 Prozent aus Stickstoff und zu 21 Prozent aus Sauerstoff. Nur ein Prozent nehmen die sogenannten „Spurengase“ ein: Kohlendioxid (CO_2), Argon, Methan und Ozon. Sie heißen so, weil sie nur in geringen Spuren in der Luft vorhanden sind. Je nach Luftfeuchtigkeit kommt noch Wasserdampf in unterschiedlicher Konzentration hinzu. Trotz ihres geringen Vorkommens sind die Spurengase für unser Klima sehr wichtig: Sie sorgen dafür, dass die Sonnenenergie auf der Erde zurückgehalten wird und nicht einfach ins All zurückstrahlt.

OZONLOCH

Ozon ist eine besondere Form von Sauerstoff, die durch energiereiche Sonnenstrahlung entsteht. Ozon in der Stratosphäre hilft, die schädliche UV-Strahlung der Sonne von der Erde fernzuhalten. Ende des 20. Jahrhunderts entdeckte man im Südsommer über der Antarktis ein immer größer werdendes Loch in der Ozonschicht. Verantwortlich dafür war ein erhöhter Gehalt von Fluorchlorkohlenwasserstoffen in der Atmosphäre – Gase, die in Spraydosen und Kühlschränken zum Einsatz kamen. Seit dem Verbot dieser Gase schließt sich das Ozonloch allmählich wieder. Es wird allerdings noch lange dauern, bis es völlig verschwunden ist.

Die Sonnenenergie ist der Motor des Erdklimas. Ihr Licht setzt alle Klimaprozesse in Gang.



Sonnenstrahlen erwärmen die Wasseroberfläche.

Warmes Meerwasser verdunstet.

Vulkane schleudern vulkanische Asche und Gase in die Atmosphäre.

Eisflächen werfen das Sonnenlicht zurück und sorgen für kühles Klima.

Kaltes Wasser sinkt in die Tiefe.

In Auftriebsgebieten steigt Tiefenwasser nach oben.

WOLKEN

Der gasförmige Wasserdampf ist unsichtbar. Was wir als Wolken oder Nebel sehen, sind winzige Wassertröpfchen oder Eiskristalle, an denen das Licht reflektiert wird. Sie haben sich an kleinste, in der Luft schwebende Teilchen wie Asche, Staubpartikel oder „Aerosole“ angelagert. Aerosole sind so klein, dass man sie nicht einmal unter dem Mikroskop erkennen kann. Sie gelangen zum Beispiel in die Luft, wenn Schwefeldioxid von Vulkanen in die Stratosphäre geschleudert wird. Die daraus entstehende Schwefelsäure zieht Wasser an und bildet mit ihm kleinste Tröpfchen.

Welche Rolle spielt das Wasser für unser Klima?

Die Erde ist der einzige Planet im Sonnensystem, auf dem Wasser in allen drei Aggregatzuständen vorhanden ist: flüssig, fest und gasförmig. Flüssig finden wir es zum Beispiel in Meeren, Seen und Bächen, als Grundwasser und als Regen. In fester Form fällt es als Hagel oder Schnee vom Himmel; in den Hochgebirgen und an den Polen bildet es Eisflächen. Gasförmig finden wir es in der Luft – in Form von Wasserdampf.

Wasser ist einer der wichtigsten Grundstoffe des Lebens – auch wir bestehen zum größten Teil aus Wasser. Nur dort, wo genügend Wasser zur Verfügung steht, können Pflanzen, Tiere und Menschen existieren.

Auf der Erde bewegt sich das Wasser in einem ständigen Kreislauf: Über den Ozeanen verdunstet es, steigt als Wasserdampf zum Himmel empor, bildet Wolken und fällt als Regen oder Schnee auf die Erde zurück. Über die Flüsse gelangt es wieder ins Meer.

Im Klimasystem der Erde kommt dem Wasser eine wichtige Aufgabe zu: Der Wasserdampf in der Atmosphäre wird durch Luftströmungen über große Entfernungen transportiert und regnet an anderer Stelle wieder ab. So wird die Feuchtigkeit, die aus Meeren, Flüssen, Seen und Wäldern verdunstet, über die ganze Erde verteilt.

In Gebieten mit viel Niederschlag sprechen wir von einem feuchten („humiden“) Klima, in Gebieten mit geringem Niederschlag von einem trockenen („ariden“) Klima.



An Gebirgshängen bilden sich Wolken und regnen sich ab.

Pflanzen nehmen tagsüber Wasser und CO_2 auf. Nachts geben sie einen Teil des CO_2 wieder ab. Das meiste Wasser verdunstet über die Blätter.



Regenwasser sammelt sich in Flüssen und gelangt wieder ins Meer. Ein Großteil versickert und bildet Grundwasser. In tiefen Bodenschichten fließt es den Ozeanen zu.

Abgestorbene Pflanzenreste bilden die Humusschicht der Böden, in der Kohlenstoff gespeichert ist.



Ein Teil des einfallenden Sonnenlichts wird von der Erdoberfläche reflektiert, ein Teil wird „geschluckt“ und in Wärme umgewandelt. Wie viel Licht zurückgestrahlt wird, hängt von der Helligkeit des Untergrunds ab: Dunkle Flächen schlucken viel Licht, helle Flächen wenig.

Was ist die Albedo?

Auch die Erdoberfläche mit Ozeanen und Landflächen, Wüsten und Eisfeldern wirkt sich auf unser Klima aus. Wenn die Sonnenstrahlen ihren weiten Weg bis zur Erde zurückgelegt haben, treffen sie, zum Teil durch die Atmosphäre gefiltert, als sichtbares Licht auf die Erdoberfläche. Dabei erwärmt sich die Erdoberfläche, jedoch nicht gleichmäßig, sondern abhängig davon, ob es sich um einen hellen oder dunk-



Methan entsteht in Sümpfen und Mooren, daher auch der Name „Sumpfgas“.

len Untergrund handelt. Eine dunkle Fläche „schluckt“ (die Wissenschaftler sagen: „absorbiert“) das Licht und erwärmt sich dadurch stark. Eine helle Fläche dagegen strahlt einen Teil des Lichtes zurück (sie „reflektiert“ das Licht) und erwärmt sich nur langsam.

Die Stärke der Rückstrahlung wird als „Albedo“ bezeichnet, ein Begriff, der sich vom lateinischen Wort „albus“ für „weiß“ ableitet. Weiße Flächen, wie zum Beispiel die großen Eis- und Schneefelder an den Polen, haben eine sehr hohe Albedo: Sie werfen über 90 Prozent des Lichtes zurück. In Gebieten mit Felsen, Wüsten und Steppen werden immerhin noch 15 bis 40 Prozent des Lichtes reflektiert.

Ein Reisbauer bei der Arbeit. Reisfelder in künstlich angelegten Sümpfen erzeugen zusätzlich Methan.



TREIBHAUSGASE

KOHLENDIOXID (CO_2)

Kohlen(stoff)dioxid ist ein farb- und geruchloses Gas, dessen Moleküle aus einem Kohlenstoffatom und zwei Sauerstoffatomen bestehen. Es ist ein Hauptbestandteil der vulkanischen Gase, entsteht aber auch bei der Verbrennung fossiler Rohstoffe – also von Kohle, Erdöl und Erdgas.

WASSERDAMPF (H_2O)

Wasserdampf ist als Gas unsichtbar. Er besteht aus zwei Wasserstoffatomen und einem Sauerstoffatom. Wasserdampf gelangt durch Verdunstung in die Atmosphäre und ist das wichtigste Treibhausgas.

METHAN (CH_4)

Methan ist ein farb- und geruchloses Gas, das aus einem Kohlenstoffatom und vier Wasserstoffatomen besteht. Es wird vor allem bei der Zersetzung von Pflanzen- und Tierresten gebildet. Deshalb produzieren zum Beispiel auch Rinder bei der Verdauung Methan. Methan ist der Hauptbestandteil von Erdgas.

ANDERE SPURENGASE

ARGON (Ar)

Das Gas Argon ist ein sogenanntes „Edelgas“, das heißt, es geht keine chemischen Bindungen ein. Mit einem Anteil von fast 1 % an der Atmosphäre ist es das häufigste Spurengas, es trägt allerdings nicht zum Treibhauseffekt bei.

OZON (O₃)

Auch Ozon ist ein Spurengas in der Atmosphäre. Seine Wirkung als Treibhausgas ist jedoch sehr gering, da es vor allem in der hohen Atmosphäre vorkommt. Während Sauerstoff nur aus zwei Atomen besteht, enthält ein Molekül Ozon drei Sauerstoffatome. In der Stratosphäre ist es als Strahlenfilter für uns sehr wichtig. In der Atemluft dagegen schadet es dem Menschen.

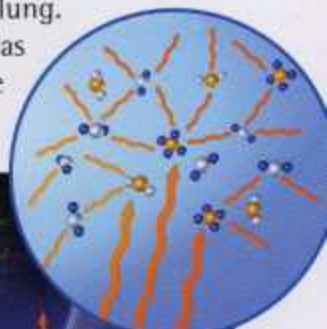
Dunkle Wälder, Böden und Ozeane werfen dagegen nur fünf bis zwanzig Prozent des eintreffenden Lichtes zurück, während der Rest in Wärme umgewandelt wird.

Betrachtet man die Erdoberfläche als Ganzes, werden durchschnittlich rund 30 Prozent des einfallenden Sonnenlichtes reflektiert. Wenn sich die Helligkeit der Oberfläche insgesamt ändert, ändert sich damit auch die Menge des zurückgestrahlten Lichtes. Dies hat großen Einfluss auf das Erdklima: Nehmen zum Beispiel während einer Eiszeit die Eis- und Schneeflächen auf der Erde zu, wird mehr Sonnenlicht reflektiert. Dies verstärkt die Abkühlung: Es wird noch kälter. Breiten sich dagegen während einer Warmzeit dunkles Ozeanwasser und Flächen mit dichtem Pflanzenbewuchs über die Erde aus, wird insgesamt weniger Licht zurückgestrahlt: Die Erwärmung wird noch verstärkt. Man nennt diesen Effekt eine positive Rückkopplung.

Wenn die Sonnenstrahlen von der Erdoberfläche reflektiert werden, wandern sie nicht direkt in den Weltraum zurück, sondern bleiben zum Teil in der Atmosphäre gefangen. Es kommt zu einer Art Wärmestau, ähnlich wie in einem Treibhaus.

Beim Treibhaus kann das Sonnenlicht zwar durchs Glasdach hineingelangen, doch wenn es vom Boden und den Pflanzen reflektiert wird, kann es nicht so leicht wieder nach außen dringen. Das liegt daran, dass die Sonnenstrahlung ihre Eigenschaften verändert: Als kurzwellige Strahlung kann sie das Glasdach durchdringen. Wenn sie aber auf den Boden auftrifft, wird sie zu langwelliger Wärmestrahlung.

Diese wird vom Glas nicht mehr ohne Weiteres durchge-



Ohne die natürlichen Treibhausgase wäre es auf unserem Planeten rund 33 Grad kälter. Wir hätten eine Oberflächentemperatur wie in einer Tiefkühltruhe: minus 18 Grad Celsius.



Die Oberflächentemperatur der Erde liegt im Mittel bei circa 15 Grad Celsius. Treibhausgase absorbieren die zurückgestrahlte Wärmeenergie und halten sie in der Atmosphäre zurück.



lassen und ist im Gewächshaus gefangen. So kommt es zu einer starken Erwärmung.

Ähnliches passiert in viel größerem Maßstab in der Atmosphäre der Erde. Hier übernehmen die Spurengase und der Wasserdampf die Rolle des Glasdaches im Gewächshaus und sorgen für einen natürlichen Treibhauseffekt – daher auch der Name „Treibhausgase“. Ohne sie wäre die Erde ein kalter, lebensfeindlicher Planet, auf dem kaum Leben existieren würde – wenn unter diesen unfreundlichen Bedingungen überhaupt Leben entstanden wäre.

Je höher der Anteil an Treibhausgasen in der Atmosphäre ist, desto

länger bleiben die Sonnenstrahlen auf der Erde gefangen und desto wärmer wird es. Weniger Treibhausgase bewirken, dass die Sonnenstrahlen rasch wieder in den Weltraum entweichen können.

Neben Wasserdampf ist vor allem

Wie kommt das Kohlendioxid in die Atmosphäre?

Kohlendioxid für den natürlichen Treibhauseffekt verantwortlich. Der größte Vorrat an Kohlenstoff befindet sich im Inneren der Erde, im sogenannten Erdmantel. Durch Vulkanausbrüche und das Austreten vulkanischer Gase

KOHLENSTOFF

Kohlenstoff mit dem chemischen Zeichen C findet man auf der Erde in verschiedensten Formen. Am edelsten ist der Diamant, aber auch Kohle, Erdöl und Erdgas enthalten Kohlenstoff. Kohlenstoff ist zudem ein wichtiger Baustein von Pflanzen und Tieren. Verbrennt man ihn, entsteht mit dem Sauerstoff (O_2) aus der Luft das gasförmige Kohlendioxid (CO_2). Löst man es in Wasser, entsteht Kohlensäure. Kohlendioxid kann sich mit vielen Stoffen verbinden und dabei auch Gesteine wie Kalk bilden.

Der natürliche Kohlenstoff-Kreislauf: Vulkane stoßen Kohlendioxid in die Luft, Gesteine, Ozeane und Pflanzen entziehen der Luft Kohlendioxid.

Bei Vulkanausbrüchen wird Kohlenstoff in Form von CO_2 freigesetzt.

Wolken nehmen Kohlensäure aus der Luft auf. Dieser schwach saure Regen lässt Gesteine schneller verwittern. Dabei wird CO_2 in Form von Kalk gebunden.

Auch Pflanzen nehmen CO_2 aus der Luft auf.

Wenn Kalk aus dem Gestein herausgelöst wird, entstehen Höhlen.

Gelöster Kalk gelangt ins Meer. Korallen bauen daraus Riffe auf.

Vulkane beeinflussen das Klima durch den Ausstoß von CO_2 langfristig, können aber auch kurzfristige Klimaschwankungen hervorrufen. Bei der Explosion des Pinatubo auf den Philippinen wurden 1991 riesige Mengen vulkanischer Asche und Schwefelsäure in die Stratosphäre geschleudert (Foto rechts). Sie wanderten um die Erde und verdunkelten den Erdball um bis zu fünf Prozent. Dadurch sanken die Durchschnittstemperaturen. Im Jahr 1815 brachen in Indonesien der Tambora und 1883 der Krakatau aus. Beide Eruptionen führten auf der Nordhalbkugel zu einer Verdunkelung. Dadurch wurde es im Schnitt um 0,3 bis 1 Grad Celsius kühler. Im Jahr 1816, dem „Jahr ohne Sommer“, wurden in Nordeuropa und in Nordamerika Schnee und Frost im Juni und Juli beobachtet. Ernteausfälle und Hungersnöte waren die Folge.



Tropfsteine in Höhlen entstehen, wenn der im Grundwasser gelöste Kalk wieder abgeschieden wird. Im Laufe der Zeit bilden sich immer neue Schichten.

gelangt er in Form von Kohlendioxid in die Atmosphäre. Das Kohlendioxid würde sich in der Luft anreichern, wenn es nicht auch Stoffe gäbe, die es der Atmosphäre wieder entziehen. Solche Stoffe, die CO_2 aus der Luft aufnehmen und speichern, nennt man Kohlendioxid-Senken.

Zu den wichtigsten Kohlendioxid-

Was sind Kohlendioxid-Senken?

Senken gehören die Gesteine. Wenn Gestein verwittert, wird aus dem Kohlendioxid der

Luft und aus bestimmten Mineralien Kalk gebildet, der sich in Wasser löst. Mit dem Regenwasser gelangt der gelöste Kalk in die Flüsse, und diese transportieren ihn ins Meer. Dort reichert er sich an.

Die Ozeane sind also ein weiterer großer Kohlendioxid-Speicher. CO_2 wird auch direkt aus der Luft vom Meerwasser aufgenommen. Dabei hängt die Fähigkeit der Ozeane, Kohlendioxid zu speichern, stark von der

Wassertemperatur ab. Erwärmt sich das Meerwasser, kann es weniger Kohlendioxid aufnehmen und gibt dieses wieder an die Luft ab.

Viele Meeresbewohner bauen aus dem im Wasser gelösten Kalk ihre Hartteile auf. Aus Kalk bestehen zum Beispiel Muschelschalen, die Stacheln der Seeigel oder Korallenskelette. Sterben diese Lebewesen, lagern sich ihre Hartteile am Meeresboden ab und werden zu Kalkstein.

Eine weitere wichtige Kohlenstoff-Senke sind die Pflanzen. Sie nehmen Kohlendioxid aus der Luft auf und bauen daraus mithilfe von Wasser und Sonnenlicht feste Substanzen wie Holz und Blätter auf. Diesen Vorgang nennt man „Photosynthese“. Allerdings wird der Kohlenstoff bei der Verwesung abgestorbener Pflanzen wieder freigesetzt und gelangt zurück in die Atmosphäre. Nur diejenigen Teile der Pflanzen, die als Humus im Boden zurückbleiben oder in Kohle und Erdöl umgewandelt werden, entziehen den darin gebundenen Kohlenstoff langfristig dem Kreislauf.

Die Menge von Treibhausgasen in der Luft, besonders von Kohlendioxid, ist also neben der Stärke der Sonnenstrahlung und der Albedo ein wichtiger „Regler“, durch den das Klima auf der Erde gesteuert wird.



Korallen in tropischen Meeren können Kalk abscheiden und daraus Riffe aufbauen.

KLEINES WETTER-LEXIKON

der Atmosphäre und damit der Luftdruck rasch ab. In fünfeinhalb Kilometern Höhe ist nur noch die Hälfte und in 30 Kilometern nur noch ein Hundertstel der Luftteilchen enthalten, die wir auf Meereshöhe vorfinden.

gepresst, erwärmt sie sich. Lässt der Druck nach, kann sie sich ausdehnen und kühlt wieder ab. Steigt nun warme Luft vom Erdboden auf, nimmt der Luftdruck ab: Die Luft kühlt ab. Je höher sie aufsteigt, desto kälter wird sie.



LUFTDRUCK

Wie alle Stoffe besteht auch die Luft aus kleinsten Teilchen, den Molekülen. Auf den untersten Luftteilchen lastet das Gewicht der gesamten darüberliegenden Luftschichten der Atmosphäre. Durch diesen Druck, den Luftdruck, wird die Luft zusammengepresst. Nach oben hin nehmen die Dichte

Die Moleküle der Luft sind frei beweglich.

LUFTTEMPERATUR

Sie fliegen durch den Raum, bis sie auf Nachbarmoleküle auftreffen und von diesen wieder abprallen. Dabei übertragen sie einen Teil ihrer Geschwindigkeit auf die anderen Moleküle. Kühlt die Luft ab, verlangsamt sich die Bewegung der Moleküle. Erwärmt sich die Luft, bewegen sie sich immer schneller. Sie prallen immer heftiger aufeinander und werden immer stärker auseinandergetrieben. Die Luft dehnt sich aus. Deshalb nimmt warme Luft bei gleichem Druck mehr Raum ein als kalte. Ändert sich der Druck, ändert sich auch die Temperatur: Wird Luft zusammen-

Sie fliegen durch den Raum,

Da die Moleküle in warmer Luft nicht

HOCH- UND TIEFDRUCK

so dicht gepackt sind wie in kalter Luft, ist warme Luft leichter als kalte und steigt nach oben. Deshalb steigen zum Beispiel auch Heißluftballons auf. Dort, wo warme Luft aufsteigt, verringert sich der Luftdruck. Es entsteht ein Gebiet geringen Drucks: ein Tiefdruckgebiet. Wo kalte Luft absinkt, entsteht ein Gebiet hohen Drucks: ein Hochdruckgebiet. Meteorologen markieren diese Bereiche in den Wetterkarten mit den Buchstaben H und T.



Je höher die Luft steigt, desto kälter wird sie. Daher ist es auf Bergen meist kälter als im Tal. Barometer messen den Luftdruck.



MACH MIT!

LUFTFEUCHTIGKEIT UND TAUPUNKT

Du brauchst: ein Glas oder eine leere Konservendose, Wasser, Eiswürfel, ein Thermometer. Fülle das Glas mit Wasser und gib Eiswürfel dazu. Nach einiger Zeit beschlägt die Außenwand des Glases. Dort kühlt die Luft ab, und dabei verringert sich ihre Fähigkeit, Wasser zu speichern. Der in ihr enthaltene Wasserdampf kondensiert und schlägt sich an der Glaswand nieder. Miss die Temperatur des Wassers, sobald die ersten Tropfen kondensieren. Die Temperatur, bei der dies geschieht, nennt man „Taupunkt“. In der Natur schlägt sich nachts bei dieser Temperatur Tau nieder.



WIND

In Tiefdruckgebieten steigt warme Luft auf, und von den Seiten fließt kalte Luft nach. So entsteht eine Luftbewegung – der Wind. Er strömt immer von Gebieten hohen Drucks zu Gebieten geringen Drucks.

Die Menge an gasförmigem Wasser-

LUFTFEUCHTIGKEIT

dampf, die sich in der Luft befindet, wird als Luftfeuchtigkeit bezeichnet. Wie viel Wasserdampf die Luft speichern kann, hängt von ihrer Temperatur ab. Kalte Luft hat wesentlich früher ihre Aufnahmegrenze erreicht als warme Luft.

Man sagt auch: Sie ist früher „gesättigt“. Je wärmer die Luft ist, desto mehr Wasser kann sie aufnehmen. So kann ein Kubikmeter Luft bei null Grad Celsius nur knapp 5 Gramm Wasser speichern, bei 35 Grad sind es dagegen fast 40 Gramm. Die Menge Wasser, die tatsächlich in der Luft enthalten ist, bezeichnet man als „absolute Luftfeuchtigkeit“. „Relative Luftfeuchtigkeit“ nennt man den Grad der Sättigung der Luft, der von der Tem-



Feuchtigkeitsmesser



Nebel (oben) und Raureif
peratur abhängt. Eine relative Luftfeuchtigkeit von 50 Prozent bedeutet, dass die Luft zur Hälfte mit Wasser gesättigt ist.

Weil Eis leichter ist als Wasser, bedeckt eine Eisschicht den See und hindert ihn daran, von Grund auf zu gefrieren. So können Wassertiere am Boden des Sees den kalten Winter überleben.



MACH MIT!

DICHTE DES WASSERS

Du brauchst: zwei Gläser, etwas Kochsalz, einen Trichter, der bis zum Boden des Glases reicht, einen Farbstoff (zum Beispiel Tinte oder Tee)

Fülle ein hitzebeständiges Glas zur Hälfte mit heißem Wasser. Färbe das kalte Wasser im anderen Glas mit Tinte (oder verwende kalten Tee). Fülle das kalte Wasser über einen Trichter vorsichtig am Boden des Glases mit heißem Wasser ein. Das kalte Wasser sammelt sich unten im Glas, während das warme Wasser aufsteigt. Probiere das Experiment nun auch mit Salzwasser und Süßwasser. Fülle ein Glas zur Hälfte mit kaltem Wasser. Löse im anderen Glas zwei Esslöffel Salz in kaltem Wasser und färbe die Lösung wieder mit Tinte (oder löse das Salz in kaltem Tee). Fülle nun die Salzlösung am Boden des Glases mit dem klaren Wasser ein, bis dieses zu etwa $\frac{3}{4}$ gefüllt ist. Das Salzwasser sammelt sich unten im Glas, das klare Wasser darüber.



Wenn warme, feuchte Luft abkühlt, führt

WOLKEN UND NIEDERSCHLAG

sie auf einmal mehr Wasser mit sich, als sie speichern kann. Es bilden sich Wolken, die die überschüssige Feuchtigkeit abregnen, oder Nebel und Raureif, die das Wasser in Tröpfchenform oder als Eis an die Umwelt abgeben.

Wasser ist bei 4 Grad Celsius am schwers-

DICHTEANOMALIE DES WASSERS

ten. Wir sagen, es besitzt bei dieser Temperatur seine höchste „Dichte“. Deshalb ist Eis leichter als Wasser und schwimmt obenauf. Bei fast allen anderen Stoffen

Ist hingegen die flüssige Form leichter als die feste. Wissenschaftler sprechen daher auch von der „Dichteanomalie des Wassers“.

Oberhalb von 4 Grad Celsius verhält sich Wasser wie die meisten anderen Stoffe: Bei Erwärmung nimmt die Dichte ab (warmes Wasser steigt nach oben), bei Abkühlung nimmt die Dichte zu (kaltes Wasser sinkt nach unten). Auch der Salzgehalt beeinflusst die Dichte: Salziges Wasser ist schwerer als Süßwasser und sinkt deshalb nach unten.

Eis taut bei null Grad Celsius zu Wasser

VERDUNSTUNGSWÄRME

(Schmelzwärme). Bei 100 Grad Celsius verdampft das Wasser, geht also in den gasförmigen Zustand über (Siedepunkt). Beide Vorgänge verbrauchen sehr viel Energie. Diese Energie nennt man Schmelzwärme bzw. Verdunstungswärme. Beim Übergang vom gasförmigen in den flüssigen Zustand („Kondensieren“) oder vom flüssigen in den festen Zustand („Gefrieren“) wird dagegen Energie in Form von Verdunstungs- bzw. Schmelzwärme frei.

Klimazonen und Wärmetransport

BOREALE ZONE

Im Norden der gemäßigten Zone, in der „borealen Zone“, sind die Winter sehr kalt und lang und die Sommer nur mäßig warm. Hier herrschen Nadelwälder und Moore vor.



Luchs



Eisbär



Schneeeule

SUBTROPEN

Die Subtropen liegen ungefähr zwischen 25 und 40 Grad nördlicher bzw. südlicher Breite. Hier gibt es Savannen und in trockeneren Gebieten vor allem Wüsten. Zu den Subtropen zählen auch Regionen wie der Mittelmeerraum.



Welche Klimazonen gibt es auf der Erde?

Rings um die Erde laufen weitreichende Gebiete, in denen das Klima einheitlich ist. Man kann drei große Klimazonen unterscheiden: die Tropen mit den Subtropen beiderseits des Äquators, die gemäßigte Zone, in der auch wir leben, und die polare Zone rund um den Nord- und Südpol. Nur auf der Nordhalbkugel (auf der Südhalbkugel existiert in diesen Breiten fast kein Festland) gibt es im Norden der gemäßigten Klimazone außerdem die „boreale Zone“.

In jeder Klimazone finden sich bestimmte Lebensräume mit einer eigenen Pflanzen- und Tierwelt.



Rotaugenlaubfrosch



Borelle



Jaguar

- Polare Zone
- Boreale Zone
- Gemäßigte Zone
- Subtropische Zone
- Tropische Zone



Weddell-Robbe



Wolf



Eich



Polarweide



Tundra



Braunbär



Rotkehlchen



Eichhörnchen



Fuchs



GEMÄSSIGTE ZONE

Die gemäßigte Klimazone reicht ungefähr vom 40. Breitengrad bis zum Polarkreis (66,5 Grad nördliche und südliche Breite). Die Pflanzenwelt ist durch Nadel-, Laub- und Mischwälder geprägt.



Skorpion



Hornvipser



Löwen



Giraffen



Elefanten

TROPEN

Die Tropen reichen vom Äquator bis zum nördlichen bzw. südlichen Wendekreis (23,5 Grad nördliche und südliche Breite). Je nach Niederschlagsmenge werden sie vor allem von tropischen Regenwäldern oder vom Grasland der Savannen beherrscht.



Känguru



POLARGEBIETE

Die Polargebiete erstrecken sich von den Polarkreisen bis zum Nord- bzw. Südpol. Im Bereich der Pole wachsen nur noch sehr wenige Pflanzen. Der Norden Kanadas, Alaskas, Grönlands und Sibiriens wird durch Tundren bestimmt, für die sehr robuste, niedrig wachsende Pflanzen typisch sind.



Pinguine

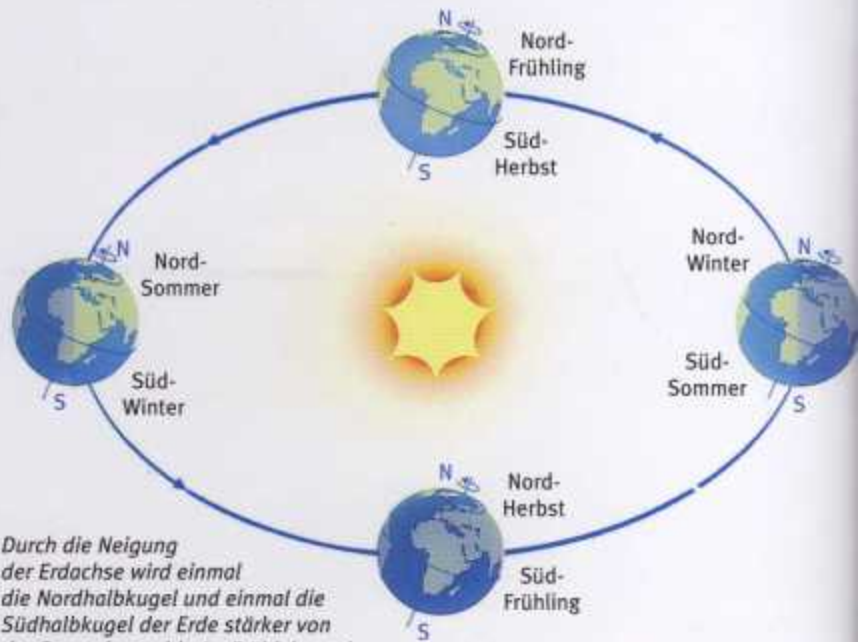
Warum ist das Klima auf der Erde so unterschiedlich?

Am Äquator herrscht das ganze Jahr über ein warmes, feuchtes Klima, es gibt kaum jahreszeitliche Unterschiede. In unseren Breiten hingegen wird das Klima von warmen Sommern und kalten Wintern bestimmt. Je weiter man sich vom Äquator zu den Polen hinbewegt, desto kühler wird das Klima.

Ursache ist die unterschiedliche Sonneneinstrahlung. Am Äquator steht die Sonne das ganze Jahr über fast senkrecht am Himmel. Dadurch treffen hier auf der gleichen Fläche etwa doppelt so viele Strahlen auf wie etwa am 60. Breitengrad in der Stadt Oslo. Rund um den Äquator herrscht also ein wärmeres Klima als weiter nördlich oder südlich. Am flachsten treffen die Sonnenstrahlen in den Polgebieten der Erde auf. Deshalb ist es dort am kältesten.

Wie entstehen die Jahreszeiten?

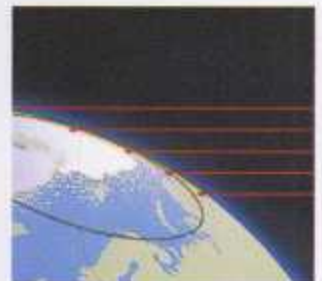
Die jahreszeitlichen Unterschiede, die das Klima in vielen Gegenden der Erde bestimmen, werden durch die leichte Schiefelage der Erdachse hervorgerufen. Während die Erde ihre jährliche Bahn um die Sonne zieht, dreht sie sich um eine



Durch die Neigung der Erdachse wird einmal die Nordhalbkugel und einmal die Südhalbkugel der Erde stärker von der Sonne bestrahlt. Im Frühjahr und Herbst erhalten beide Hälften etwa gleich viel Sonnenlicht.

gedachte Achse. Diese steht aber nicht senkrecht auf der Umlaufbahn um die Sonne, sondern ist um 23,5 Grad geneigt. Dadurch kehrt sich im Laufe des Jahres einmal die nördliche und einmal die südliche Erdhälfte stärker der Sonne zu. So entstehen die Jahreszeiten.

Ist zum Beispiel die Nordhalbkugel mehr der Sonne zugewandt, herrscht bei uns Sommer. Die Tage sind länger, und die Sonne hat mehr Zeit, um die Erde zu erwärmen. Auch durchläuft sie einen höheren Bogen am Himmel als im Winter. Je höher sie steht, desto steiler treffen ihre Strahlen auf die Erdoberfläche und desto stärker erwärmt sich diese. Ist



An den Polen fallen die Sonnenstrahlen flacher ein als am Äquator. Dort muss die gleiche Menge an Sonnenlicht eine viel größere Fläche erwärmen.



Jahreszeiten, wie wir sie kennen, gibt es in den Grasländern der Savannen nicht. Das Klima wird von einer Regenzeit im Sommer und einer Trockenzeit im Winter bestimmt.

JAHRESZEITEN

In den Tropen ist es das ganze Jahr über gleichmäßig warm, Tag und Nacht sind nahezu gleich lang. In den Subtropen ähnelt das Klima im Sommer dem der Tropen, im Winter wird es aber etwas kälter. Die Jahreszeiten sind schon etwas stärker ausgeprägt. In der gemäßigten Klimazone gibt es bereits große jahreszeitliche Unterschiede. Rund um den Nord- und den Südpol sind die Unterschiede am stärksten ausgeprägt, ebenso die Länge von Tag und Nacht: Es gibt sehr lange Sommer und Winter, wobei im Sommer der Tag und im Winter die Nacht 24 Stunden lang sein können.

Frühling, Sommer, Herbst und Winter – der Wechsel der Jahreszeiten prägt das Klima in den gemäßigten Breiten.



hingegen die Südhalbkugel mehr der Sonne zugewandt, herrscht dort Sommer und bei uns Winter.

Gemessen an den Sonnenstrahlen, die auf der Erde auftreffen, müsste es an den Polen eigentlich noch viel kälter und am Äquator noch viel heißer sein. Doch zwischen den verschiedenen Regionen der Erde findet ein ständiger Wärmeaustausch statt. Dieser Wärmeaustausch wird vor allem durch Luftströmungen (Winde) und durch das Wasser (durch Wolken und Meeresströmungen) bewerkstelligt.

Rund um den Globus sind die Luftmassen in ständiger Bewegung („Zirkulation“). Würde sich die Erde nicht drehen und wäre ihre Achse nicht geneigt, gäbe es eine einfache, weltweite Luftzirkulation: Die warme Luft würde am Äquator aufsteigen und in großer Höhe nach Norden und Süden zu den Polen strömen. Dort würde sie absinken

und nahe der Erdoberfläche wieder zum Äquator zurückfließen. In Wirklichkeit gibt es aber pro Halbkugel drei Zirkulationssysteme (auch „Strömungszellen“ genannt), die für die Wärmeverteilung auf der Erde sorgen: die tropische Zelle, die Zelle der gemäßigten Breiten und die polare Zelle. Sie bestimmen das Klima in den drei großen Klimazonen Tropen mit Subtropen, gemäßigte Breiten und Polargebiete.

Was ist die globale Zirkulation?

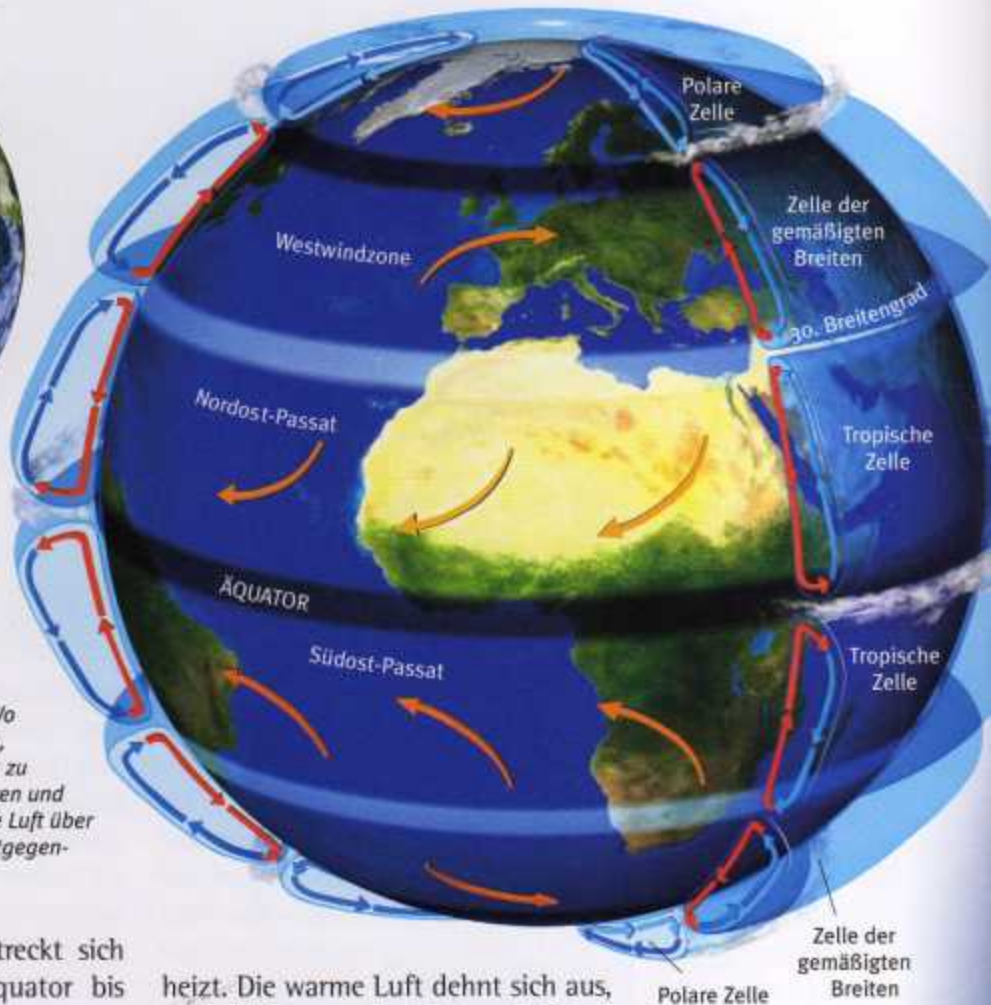
STADTKLIMA



Städte haben ihr ganz besonderes „Mikroklima“. Im Vergleich zum Umland ist es dort meist deutlich wärmer. Denn die vielen Gebäude heizen sich relativ stark auf und wirken wie ein Wärmespeicher. Durch die Bebauung wird auch die Luftzirkulation behindert. Frische Luft vom Umland kann daher weniger zur Abkühlung beitragen als in einer unbebauten Region.



Am Äquator steigt feuchte Luft auf, strömt nach Norden und Süden, sinkt über dem 30. Breitengrad ab und fließt zum Äquator zurück. Von den Polen fließt schwere Kaltluft in Richtung Äquator. Wo sie auf die Westwindzone trifft, steigt sie auf und fließt zurück zu den Polen. Zwischen der polaren und der tropischen Zelle strömt die Luft über den gemäßigten Breiten in entgegengesetzter Richtung.



Was geschieht in der tropischen Zelle?

Die tropische Zelle erstreckt sich vom Äquator bis ungefähr zum 30. Breitengrad. Da die Sonnenstrahlen am Äquator immer in einem sehr steilen Winkel einfallen, werden dort die Erde und die darüberliegende Luft sehr stark aufge-

heizt. Die warme Luft dehnt sich aus, wird leichter und steigt auf. Dabei nimmt der Luftdruck ab. So entsteht am Äquator ein schmales, bandartiges Tiefdruckgebiet. Beim Aufsteigen kühlt die Luft ab und kann nun immer weniger Wasserdampf speichern. Es bilden sich Tröpfchen: Wolken entstehen. Daher kommt es am Äquator nachmittags, wenn es am wärmsten ist, oft zu tropischen Gewittern.

In großer Höhe strömt die Luft nun nach Norden und Süden. Etwa auf der Höhe des 30. Breitengrads sinkt sie wieder ab. Die absinkende Luft wird zusammengedrückt, erwärmt sich und wird dadurch extrem trocken. Hier, in den Subtropen, findet man also ein Hochdruckgebiet, und hier

TROPENGEWITTER

Auch in den Tropen kühlt es nachts etwas ab, sodass sich Nebel bilden kann. Am Morgen strahlt dann die Sonne vom wolkenlosen Himmel. Es wird heiß, viel Wasser verdunstet, die Luftfeuchtigkeit steigt, und es bilden sich Wolken. Bis zum Nachmittag verdichten sich die Wolken immer mehr, bis sie sich in heftigen Gewittern und starken Regenfällen entladen. Gegen Abend klart es dann wieder auf – und am nächsten Morgen beginnt das Schauspiel von Neuem.



Morgennebel über tropischem Regenwald

WÄRMEKAPAZITÄT

nennen wir die Fähigkeit eines Körpers, Energie in Form von Wärme zu speichern. Stoffe mit niedriger Wärmekapazität wie Luft oder Sand lassen sich leicht erwärmen, sie geben die Wärme aber auch schnell wieder ab. Stoffe mit hoher Wärmekapazität wie zum Beispiel Wasser erwärmen sich nur langsam, geben die Wärme aber auch langsam wieder ab und sind daher sehr gute Wärmespeicher. Um Wasser ähnlich stark zu erwärmen wie Sand, braucht man etwa viermal so viel Energie.



Passatwinde wehen zuverlässig und treiben so die Segelschiffe voran.

In den Subtropen liegen große Wüsten: links die Sonora-Wüste in Mexiko, rechts die Namib in Südwesafrika.



liegen auch die großen Wüsten der Erde, wie die Sahara in Nordafrika oder die Große Sandwüste in Australien. Vom 30. Breitengrad fließt die Luft nun wieder zurück in Richtung Äquator. Diese Luftströmungen, die von Norden und Süden Richtung Äquator wehen, sind sehr beständig und werden „Passatwinde“ genannt.

In der polaren Zelle fallen die Sonnenstrahlen auch im Sommer nur in einem sehr flachen Winkel ein, und im Winter ist es ständig dunkel. Zudem wird hier viel Sonnenlicht ins All zurückgestrahlt, da Land und Meer von Eis bedeckt sind. Die Erde ist also sehr kalt, ebenso die darüberliegende Luft. Die schwere Kaltluft lastet auf der Erde, und der Luftdruck ist hoch. So entstehen an den Polen stabile Hochdruckgebiete. Von ihnen wehen Winde in Richtung Äquator.

Die dritte Strömungszelle befindet sich über der gemäßigten Klimazone. Hier herrschen vor allem Westwinde vor. Diese Zelle ist zudem durch abwechselnde Hoch- und Tiefdruckgebiete geprägt. Durch die Drehung der Erde geraten sie in Rotation, und es entstehen kreisförmige Hoch- und Tiefdrucksysteme. An ihren Rändern werden die Luftströmungen abge-

Was geschieht in den beiden anderen Strömungszellen?

lenkt. Deshalb kann der Wind bei uns aus allen Himmelsrichtungen kommen, obwohl Westwinde überwiegen.

Wasser hat eine ganz besondere Eigenschaft: Es besitzt eine hohe Wärmekapazität, das heißt, es kann sehr gut Wärme speichern und bei entsprechender Strömung an andere Orte trans-

Wie entstehen Seewind und Landwind?

PERMAFROST



Ein Merkmal der Polargebiete ist der Dauerfrost- oder Permafrostboden. Aufgrund der dauerhaft niedrigen Temperaturen bleibt er ab einer bestimmten Tiefe das ganze Jahr über gefroren. Permafrostböden sind während der Eiszeiten entstanden und bergen gelegentlich spektakuläre Fossilfunde. So hat man in Sibirien schon mehrere Mammuts entdeckt, die vor 10 000 Jahren starben und im Permafrost wie in einer Tiefkühltruhe „frisch“ gehalten wurden.





Tagsüber steigt über dem Land warme Luft auf, kalte Luft strömt vom Meer nach. Nachts ist die Luft über dem Meer wärmer und steigt auf, vom Land fließt kalte Luft nach.

portieren. An der Küste lassen sich die Auswirkungen der unterschiedlichen Wärmekapazität von Festland und Wasser gut beobachten.

Bei ruhigem Wetter kann man dort mittags einen leichten landwärts gerichteten Wind beobachten, der sich abends und nachts umkehrt und dann in Richtung Wasser weht. Das liegt daran, dass sich morgens das Land und die darüberliegende Luft schneller erwärmen als das Wasser. Die wärmere Luft über dem Land steigt auf, und kühle Seeluft fließt nach. Abends und nachts kühlen das Land und die darüberliegende Luft dagegen schneller ab als das Wasser, das die Wärme lange

speichert. Daher steigt nun die wärmere Luft über dem Wasser auf, und kalte Festlandsluft fließt nach. Diese Luftströmungen sorgen für einen beständigen Wärmeausgleich zwischen Meer und Land.

Was an einer Küste im Kleinen

Wie entsteht das Monsun-Klima?

geschieht, spielt auch im Großen eine Rolle – nämlich dort, wo große Kontinentmassen

neben großen Ozeanen liegen. Ein Beispiel ist das Monsun-Klima in Asien. Im Sommer erwärmt sich die riesige Landmasse Asiens weit stärker,

WETTERLAGE

Den Wärmeaustausch durch Wind erleben wir auch in Deutschland bei unterschiedlicher Großwetterlage. Der Ostwind hat seinen Ursprung in Russland und ist deshalb trocken. Kommt die Luft im Winter aus Osten, wo sie sich über dem Festland abgekühlt hat, kann es bitterkalt werden. Westwind hingegen bringt feuchtwarmer Atlantikluft mit sich und sorgt oft für Regen. Bei südlicher Luftströmung wird warme Mittelmeerluft zu uns getragen.

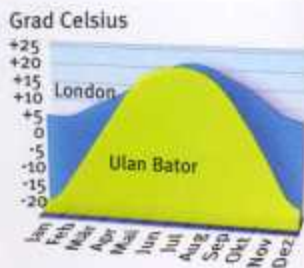
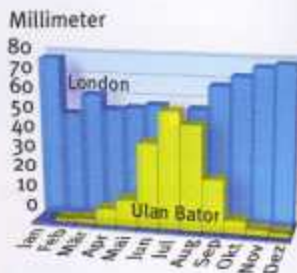
MARITIMES UND KONTINENTALES KLIMA

Die ausgleichende Wirkung des Meeres sorgt für ein mildes „maritimes Klima“. In London zum Beispiel, das vom Atlantik beeinflusst wird, ist die Temperatur das ganze Jahr über relativ ausgeglichen. Es regnet viel, auch im Winter (rechts). Die

Mongolei hingegen (Foto unten) ist durch



ein typisches Landklima („kontinentales Klima“) geprägt: In der Hauptstadt Ulan Bator schwanken die Tagestemperaturen zwischen –20 Grad Celsius im Winter und +20 Grad Celsius im Sommer. Im Winter ist es nicht nur sehr kalt, sondern auch extrem trocken. Nur von Juni bis August, wenn der Monsun sich auswirkt, fällt kräftig Regen.



Jährliche Niederschläge (oben) und Tagestemperaturen in London und Ulan Bator



ker als der Indisch-Pazifische Ozean. Über dem Land steigt also warme Luft auf und wird durch vom Meer nachfließende Luft ersetzt. So entwickelt sich eine starke Luftströmung, die feuchte Meeresluft nach Asien trägt. Dabei steigt die Luft auf und kühlt ab. Der Wasserdampf in der Luft kondensiert zu Wassertropfchen, und es bilden sich Wolken, die reichlich Regen bringen – den sogenannten Monsun.

Im Winter kühlt dagegen der Kontinent rascher ab als der Ozean. Nun fließt von der Landmasse Asiens kalte und schwere kontinentale Luft Richtung Ozean. Da die Luft über dem Kontinent wenig Wasser aufnehmen kann und sich auf dem Weg in Richtung Ozean auch noch erwärmt, sinkt die relative Luftfeuchtigkeit: Die Luft wird sehr trocken. Auf diese Weise entsteht das Monsun-Klima, das durch den Wechsel von einer Sommer-Regenzeit und einer Winter-Trockenzeit geprägt ist.

Was passiert am Rand von Gebirgen?

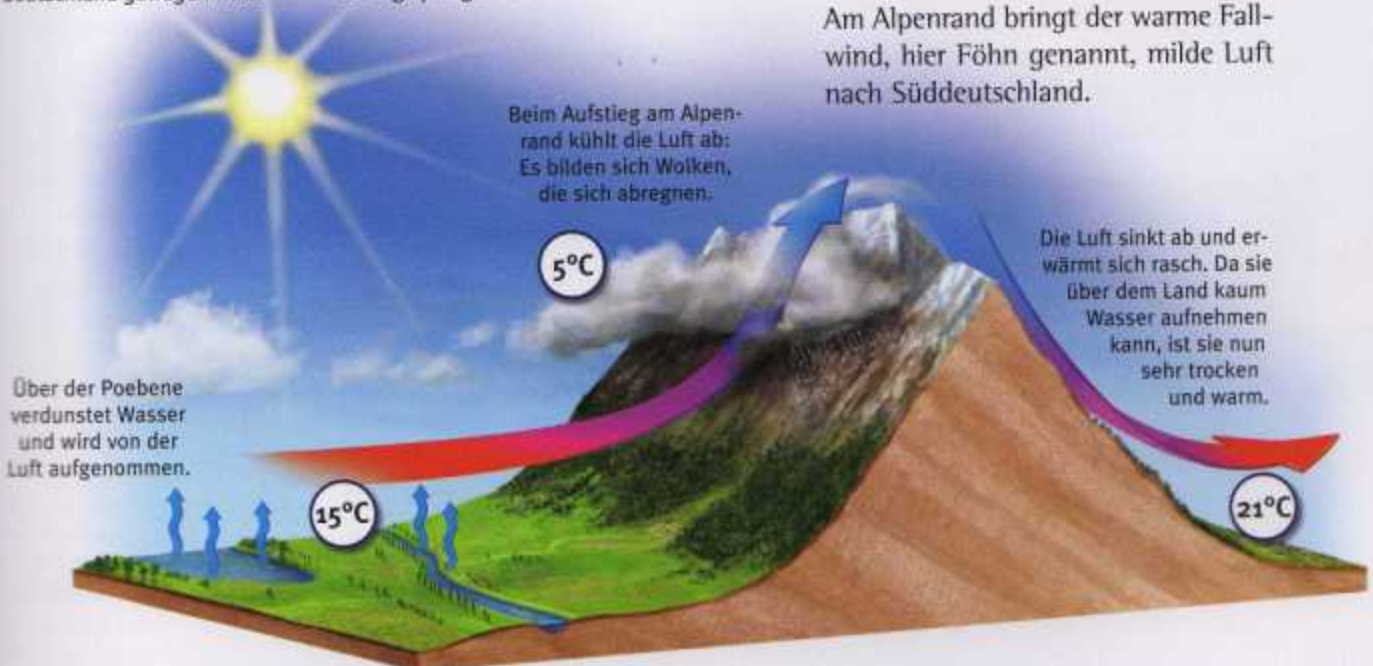
Eine besondere Form der Wärmeübertragung können wir am Rande von hohen Gebirgen spüren. Wenn feuchtwarmer

Luft am Rande des Gebirges aufsteigt, kühlt die Luft ab: Wolken bilden sich und regnen ab. Bei der Wolkenbildung wird die im Wasserdampf gespeicherte Energie, die Verdunstungswärme, freigesetzt und an die aufsteigende Luft abgegeben. Dadurch kühlt die weiter aufsteigende Luft jetzt langsamer ab.

Nach Überschreiten des Gebirgskammes sinkt die Luft ab und erwärmt sich. Da sie über dem Land kaum Wasser aufnehmen kann, ist sie nun sehr trocken und warm. Während beim Aufstieg der Luft die Abkühlung durch Wolkenbildung gebremst wird, erwärmt sich die Luft beim Abstieg ungehindert, sodass die Lufttemperatur im Gebirgsschatten schließlich deutlich höher ist als zu Beginn. In den Anden finden wir zum Beispiel im Gebirgsschatten die Atacama-Wüste. In Argentinien können die absteigenden Luftmassen zu Temperaturen von über 50 °C führen. Am Alpenrand bringt der warme Fallwind, hier Föhn genannt, milde Luft nach Süddeutschland.

Am stärksten ist der Monsun im Raum des Indischen Ozeans ausgeprägt. Hier kommt es oft zu sintflutartigen Regenfällen. Die abfließenden Wassermassen überfluten Straßen wie hier in Indien oder führen in Ländern wie Bangladesch regelmäßig zu Flutkatastrophen.

Föhn entsteht bei Nordwind, wenn aus Italien feuchtwarmer Luft über die Alpen nach Süddeutschland getragen wird.





Was treibt die großen Ozeanströme an?

Wegen der hohen Wärmekapazität des Wassers sind Meeresströmungen für das globale Klima von besonderer Bedeutung. Sie transportieren warmes Wasser vom Äquator in Richtung der Pole und sorgen so für einen weltweiten Temperatursausgleich. Ein Beispiel dafür ist der Golfstrom, der wie eine Art Warmwasserheizung den Nordatlantik erwärmt und für ein mildes Klima in Nordeuropa sorgt.

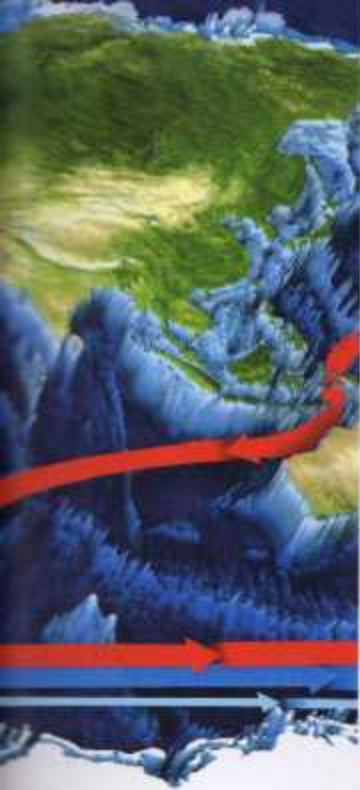
Angetrieben werden die großen Meeresströmungen vom Wind und von Unterschieden in Temperatur und Salzgehalt des Wassers („thermohaline Zirkulation“). Winde drücken auf die Meeresoberfläche und treiben dabei das Wasser vor sich her. Gäbe es keine Kontinente, würde sich nördlich und südlich des Äquators wegen der Nordost- und Südost-Passate eine westwärts gerichtete Strömung um den ganzen Erdball ausbilden. Dagegen käme es in den gemäßigten Breiten, in denen Westwinde vorherr-

GOLFSTROM

Der Golfstrom entspringt in den Tropen, wo sich das Wasser stark erwärmt. Durch die am Äquator herrschenden Winde wird der Strom zunächst nach Westen getrieben. Dort versperrt aber die Küste Amerikas den Weg, so dass ein Teil des warmen Wassers nach Norden umgelenkt wird. Entlang der Küste Südamerikas fließt es durch die Karibik nach Norden und vereinigt sich dort mit dem warmen Nordäquatorialen Strom. Mit ihm bildet es nun den mächtigen Golfstrom. Auf dem Weg nach Norden kühlt das Wasser immer mehr ab. Dabei wird es schließlich so schwer, dass es in der Arktis in die Tiefen des Ozeans absinken kann.

Palmen in Südengland, Apfelblüte in Norwegen – der Golfstrom sorgt für ein mildes Klima.





Wie Förderbänder transportieren Meeresströmungen warmes und kaltes Wasser und sorgen für eine globale Wärme-Umverteilung. Rund um die Antarktis fließt der Zirkumantarktische Strom, sodass dort ein Austausch zwischen kaltem polarem und warmem äquatorialem Wasser kaum möglich ist.

schen, zu einer die Erde umspannenden ostwärts gerichteten Strömung.

Dies verhindern jedoch die großen Landmassen der Kontinente. Daher müssen die Ströme, die von den Passatwinden angetrieben werden, an den amerikanischen bzw. an den australisch-asiatischen Ostküsten nach Norden oder Süden ausweichen. So entstehen die großen Oberflächenströmungen, die in den Polargebieten in die Tiefe sinken und dann die kalten Tiefenströme der Ozeane bilden.

Das Gewicht oder, besser gesagt,

Was ist die „thermohaline Zirkulation“?

die „Dichte“ des Meerwassers wird durch seine Temperatur und seinen Salzgehalt („Salinität“) bestimmt. Derzeit wird das schwerste Wasser in den Polarregionen erzeugt. Das liegt nicht nur an den tiefen Temperaturen, die dort herrschen. Auch die Bildung des See-Eises spielt dabei eine wichtige Rolle. Wenn Meerwasser zu Eis gefriert, bleibt das Salz im Meer zurück, denn Eis besteht aus reinem Süßwasser. Dadurch erhöht sich der Salzgehalt des Meerwassers, und das nun sehr

schwere Wasser sinkt in die Tiefen des Ozeans. Wenn Wasser absinkt, muss es aber an anderer Stelle wieder an die Oberfläche kommen. Dies geschieht in den sogenannten „Auftriebsgebieten“, zum Beispiel vor der südamerikanischen Küste bei Peru oder der afrikanischen Küste bei Namibia. Das kalte Meerwasser, das hier aus der Tiefe aufsteigt, ist besonders reich an Nährstoffen. Deshalb zeichnen sich diese Regionen durch einen enormen Fischreichtum aus.

VERSIEGT DER GOLFSTROM?

Der Golfstrom kann nur bis in den Nordatlantik vorstoßen, weil das Wasser dort in die Tiefe absinken kann. Erwärmt sich die Erde und schmilzt das Eis auf Grönland, könnte das frei werdende Süßwasser den Salzgehalt des Meerwassers so stark herabsetzen, dass das Wasser zum Absinken nicht mehr schwer genug wird. Dasselbe könnte passieren, wenn es nicht mehr genügend abkühlt. Dann müsste der Golfstrom versiegen, weil sein Abfluss fehlt. Der Nordatlantik würde erheblich abkühlen; eine neue Eiszeit könnte die Folge sein. Zeitweise schienen die Strömungen zu erlahmen, haben sich inzwischen aber wieder erholt. Die Forscher rechnen derzeit nicht mit einem Aussetzen des Golfstroms.

Die „thermohaline Zirkulation“:

4) Kaltes salzhaltiges Wasser sinkt in die Tiefe.

3) An den Polen gefriert das Meerwasser teilweise zu Eis, der Salzgehalt des Wassers steigt.

2) Wind drückt das Wasser in Richtung der Pole. Dabei kühlt es ab.

1) In den Tropen heizt die Sonne den Ozean auf, Wasser verdunstet. Dadurch erhöht sich der Salzgehalt im Meer.

5) Tote Fische und andere Organismen sinken zu Boden und lösen sich auf. Nährstoffe werden an das Wasser abgegeben.

6) Tiefenwasser fließt in Richtung Äquator.

7) Vor den Küsten der Kontinente steigt das Tiefenwasser auf. Es nimmt Nährstoffe vom Meeresgrund mit nach oben.

KLIMAZEUGEN DER ERDGESCHICHTE

Das Klima der Vergangenheit ist überall auf der Erde in sogenannten Klimazeugen dokumentiert. Zu ihnen gehören zum Beispiel Gesteine, Kohlen, Moränen oder Fossilien (versteinerte Lebewesen). Klimazeugen verraten den Forschern, wie das Klima zu ihrer Entstehungszeit vor Millionen von Jahren gewesen sein muss.

GLETSCHER

Gletscher bestehen zwar zum größten Teil aus Eis, sie führen aber auch Steine und Geröll mit sich. Wenn Gletscher über den Untergrund fließen, hinterlassen sie dort ihre Spuren. Die mitgeschleppten Steine schleifen schroffe Felsen zu sogenannten Rundhöckern ab. Auch die Schleifsteine selbst werden dabei angeschliffen und zerkratzt. Man nennt sie deshalb auch „gekritzte Geschiebe“. Erlahmt schließlich die Transportkraft des Eises oder schmilzt es, bleibt der mitgeführte Gesteinsschutt als „Moräne“ liegen. Selbst wenn das Eis seit Millionen von Jahren verschwunden ist, bezeugen Rundhöcker, Gletscherschliffe, eingeritzte Furchen und Moränen, dass hier einmal ein Gletscher gewesen sein muss.

Auch versteinerte Bäume geben deutliche Hinweise auf das Klima in der Erdgeschichte. Bäume in den gemäßigten Breiten bilden Wachstumsringe aus, die den Wechsel der Jahreszeiten anzeigen. Pro Jahr entsteht ein neuer Ring. Im Frühjahr wachsen die Pflanzen kräftig, im Sommer und Herbst verlangsamt sich das Wachstum, und im Winter herrscht Ruhezeit. Dieser Wachstumswechsel ist an den Jahresringen gut erkennbar. Durch Abzählen der Ringe kann man das Alter des Baumes ermitteln, und bei genauerer Untersuchung lässt sich sogar feststellen, ob ein Winter mild oder streng und ein Frühjahr oder Sommer feucht oder trocken war. Anders als in den gemäßigten Breiten gibt es am Äquator keine Jahreszeiten. Die Bäume des tropischen Regenwaldes wachsen das ganze Jahr über und bilden keine Baumringe aus.

Versteinerter Stamm mit Jahresringen aus dem Nationalpark „Petrified Forest“ in den USA

KLIMAZEUGEN

GLETSCHER

BÄUME



*Gekritzte
Geschiebe*



Gletscherschliff



Rundhöcker





Strukturböden mit Frostmustern



Würgeböden



Salz im Death Valley, USA

Die Permafrostböden in den Polargebie-

ten sind dauerhaft gefroren. Nur die oberste Schicht taut im Sommer auf. Dabei zerfließt der Boden leicht – sogenannte Fließerden oder Würgeböden entstehen. Wenn der Boden dann wieder gefriert, bilden sich im lockeren Untergrund bestimmte Muster, „Strukturböden“ genannt. Diese speziellen Bodenformationen können sehr lange erhalten bleiben. In Süddeutschland zum Beispiel findet man über 10 000 Jahre alte Würgeböden. Dies zeigt uns, dass es hier einmal viel kälter war.

Tropfsteine bilden wie Bäume Wachstumsringe aus, allerdings viel langsamer. Sie können weit über 100 000 Jahre alt werden. Anhand ihrer kalkigen Anwachs-

säume, die sich im Laufe der Jahrtausende gebildet haben, lässt sich das Klima in der Umgebung der Tropfsteinhöhle ermitteln.

Am Äquator ist es das ganze Jahr feucht und heiß, sodass sich dort tropischer Regenwald ausbreiten kann. In flachen, sumpfigen Gebieten können abgestorbene Bäume und andere Pflanzen oft nicht vollständig verwesen. Aus

ihren Überresten entsteht Kohle, die wir heute im Ruhrgebiet, im Aachener Revier, im Saargebiet und in den Appalachen in Nordamerika finden und abbauen können. Dies zeigt, dass dort früher ein tropisches Klima geherrscht haben muss.



Bei Trockenheit schrumpfen die Böden und reißen auf: Trocken-

risse entstehen. Salzkrusten bilden sich, wenn das wenige Wasser in regenarmen Gebieten verdunstet und die darin gelösten Salze auf dem Boden zurückbleiben. So entstehen auch Kalk- oder

Gipskrusten. Sand wird in Trockengebieten vom Wind zu Dünen aufgehäuft oder als Flugsand auf großen Flächen verteilt. Versteinerte Dünen, Trockenrisse oder Salz-Abdrücke (oben rechts) zeigen also an, dass das Klima zu ihrer Entstehungszeit sehr trocken war.



In flachen Tropenmeeren wachsen Warmwasser-Riffe, die von Kalkalgen, Schwämmen oder

Korallen aufgebaut werden. Versteinern die Riffkalke im Laufe der Zeit, können daraus Gebirge wie die Dolomiten (unten) oder die nördlichen Kalkalpen entstehen. Sie sind also Klimazeugen, die auf ein wärmeres Klima hinweisen.

KALKRIFFE



In der Antarktis und in Grönland

EIS

ist das Eis der letzten 400 000 Jahre erhalten.

Da im Sommer an den Polen immer die Sonne scheint und im Winter ständig Nacht herrscht, ist das Eis im Jahreswechsel unterschiedlich ausgebildet. Durch kilometertiefe Bohrungen

können Wissenschaftler zu Eisschichten vordringen, die vor vielen Tausend Jahren entstanden sind. Die entnommenen Eisbohrkerne werden im Labor analysiert. Anhand der Schichten in den Eisbohrkernen lässt sich, wie bei den Jahresringen eines Baumes, das Alter des Eises abzählen. Auch über das Klima in der Vergangenheit kann uns das Eis vieles verraten. Die Forscher untersuchen winzige Luftbläschen im Eis und erfahren so, wie die Atmosphäre der Erde zu der Zeit zusammengesetzt war, als die Luft im Eis eingeschlossen wurde. Aus dem Eis selbst lässt sich ableiten, welche Temperaturen damals geherrscht haben müssen.





Im Jungpräkambrium vor 700 Mio. Jahren glich die Erde einem riesigen Schneeball.



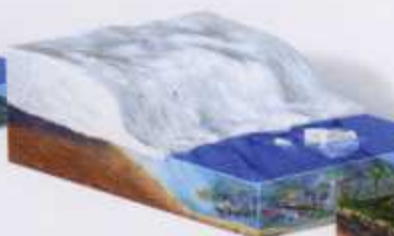
Im warmen Klima des Kambriums vor 542 Mio. Jahren entstand in den Meeren reiches Leben. Das bezeugen viele Fossilfunde.



Am Ende des Ordoviziums vor 450 Mio. Jahren kühlte die Erde so stark ab, dass ein Großteil der Lebewesen ausstarben.



Im Karbon vor 320 Mio. Jahren war der Südpol vereist. Am Äquator wuchs tropischer Regenwald, der die Grundlage für die Entstehung von Steinkohle bildete.

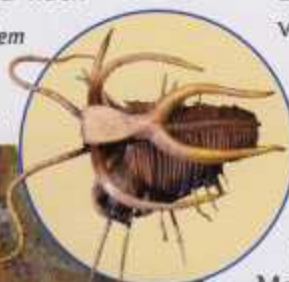


Das Klima in der Erdgeschichte

Wie war das Klima in der Frühzeit der Erde?

Aus der Frühzeit der Erde sind keine Gesteine überliefert, die uns Hinweise auf das Klima geben könnten. Die früheste Zusammensetzung der Atmosphäre kennen wir nicht. Vermutlich war die Oberfläche der Erde kurz nach

Eisen-Stromatolithe aus dem Präkambrium (unten), Modell eines Gliederfüßers aus dem Kambrium



ihre Entstehung so heiß, dass das Wasser nicht kondensieren konnte. Es gab daher wohl noch keine Ozeane, aber sehr viel Wasserdampf in der Atmosphäre. Erst vor rund vier Milliarden Jahren hatte sich die Erde so weit abgekühlt, dass sich das Wasser in einem Urozean sammeln konnte, der nun die Erdoberfläche bedeckte.

Zu jener Zeit war die Atmosphäre vermutlich etwa so zusammengesetzt wie heute die unserer Nachbarplaneten Venus und Mars: Sie bestand zu 96 bis 98 Prozent aus Kohlendioxid. Das änderte sich vor etwa zwei Milliarden Jahren, als in den Meeren Lebewesen entstanden, die verstärkt Sauerstoff produzierten.

Erstes Leben ist uns schon aus dem frühen Präkambrium vor etwa 3,8 Milliarden Jahren bekannt. Doch vor gut zwei Milliarden Jahren breite-

HÄMATIT

Aus der Zeit vor etwa zwei Milliarden Jahren sind in den Gesteinen rote Eisenerze und rote Ablagerungen („Sedimente“) erhalten. Die rote Farbe ist auf ein sauerstoffreiches Eisenoxid, genannt Hämatit, zurückzuführen. Hämatit kann sich nur dann bilden, wenn in der Luft genügend Sauerstoff zur Verfügung steht. Dies zeigt, dass die Atmosphäre vor zwei Milliarden Jahren schon deutlich mehr Sauerstoffanteile enthalten haben muss als in der Frühzeit der Erde.



In der Kreidezeit vor 100 Mio. Jahren war es selbst an den Polen so warm, dass dort Bäume gedeihen und Dinosaurier leben konnten.

Im Tertiär kam es zu einem Klimasturz. Seit etwa 2,5 Mio. Jahren befindet sich die Erde in einem Eiszeitalter.



KONTINENTALDRIFT

Die Erde ist kein starres Gebilde. Langsam wandern oder „driften“ die Kontinente über ihre Oberfläche. So verändert die Erde über Jahrmillionen ihr Aussehen.



Im Quartär vor 20 000 Jahren waren große Teile Norddeutschlands und Polens, aber auch die Alpen mit einem Eispanzer bedeckt. Mammuts lebten in den Tundren und wurden von Urmenschen gejagt.

ten sich in den Meeren Matten aus Bakterien, Pilzen und Algen aus, die versteinert als „Stromatolithe“ überdauert haben. Diese Matten aus Kleinstlebewesen waren in der Lage, Kohlendioxid mithilfe der Sonnenenergie in organische Substanz umzuwandeln. Bei diesem Vorgang, der „Fotosynthese“, wurde Sauerstoff freigesetzt. So dürfte also das frühe Leben auf der Erde für den allmählichen Umschwung zu einer sauerstoffhaltigen Atmosphäre verantwortlich gewesen sein.

Seit gut zwei Milliarden Jahren

gibt es auch die ersten bekannten Zeugen von Eiszeiten, nämlich Gletscherschiffe, Moränen und

Wann gab es die ersten Eiszeiten?

durch Eisberge mitgeführtes Geröll, sogenannte Dropstones. Seitdem hat das Klima auf der Erde immer wieder zwischen lang andauernden Kaltzeiten und Warmzeiten geschwankt. Dabei bewegten sich die Temperaturen der Meere, in denen sich das Leben entwickelte, im globalen Mittel aber stets zwischen null und 40 Grad Celsius, denn nur so war ein Leben auf der Erde überhaupt möglich. Was aber hat die Temperaturen in dieser vergleichsweise schmalen Bandbreite gehalten? Warum war es wegen der höheren Konzentration des Treibhausgases CO₂ nicht wesentlich wärmer als heute?

Dafür ist wiederum unser wichtigster Energielieferant, die Sonne, verantwortlich. Diese strahlte nämlich zu Beginn der Erdgeschichte etwa um ein Fünftel weniger stark als heute.



Diese 635 Millionen Jahre alten Moränen aus der Wüste Namib in Afrika bezeugen, dass zu jener Zeit die ganze Erde vereist war.



280 Millionen Jahre alte „Dropstones“ aus Argentinien. Sie wurden von schmelzenden Eisbergen zurückgelassen.



Im Laufe der Erdgeschichte nahm die Sonnenstrahlung dann immer mehr zu, während der CO₂-Gehalt allmählich sank – hervorgerufen durch die Entwicklung der Pflanzen, die der Luft CO₂ entzogen. Auf diese Weise hat die Wechselwirkung von Sonnenenergie und Treibhauseffekt mithilfe der ersten Lebewesen das Klima im Gleichgewicht gehalten.

War die Erde schon einmal ganz von Eis bedeckt?

Nach einer langen Wärmeperiode wurde es gegen Ende des Präkambriums auf der Erde bitterkalt. In Gesteinen, die zwischen 850 und 600 Millionen Jahre alt sind, finden wir Klimazeugen, die sogar auf Gletschereis am Äquator hinweisen. Über die Ursachen dieser extremen Abkühlung rätseln die Forscher noch. Vermutlich bildete sich auf der Erde infolgedessen sinkender

Temperaturen zunächst Eis an den Polen. Das helle Eis reflektierte die Sonnenstrahlung, dadurch kühlte die Erdoberfläche noch weiter ab, die Vereisung nahm weiter zu und erreichte schließlich sogar den Äquator. Alle Ozeane waren nun mit Eis bedeckt – die Erde glich einer einzigen riesigen Schneekugel. Wissenschaftler sprechen von einer „Snowball Earth“ („Schneeball-Erde“). Gesteine aus jener Zeit zeigen, dass die Erde damals mehrere solcher extremen Kaltzeiten erlebte, unterbrochen von Wärmeperioden.

Unabhängig von der vereisten Erdoberfläche wirkten aber die Kräfte im Inneren der Erde weiter. Dort, im heißen oberen Erdmantel, bildet sich ständig geschmolzenes Gestein (Magma)

Wie konnte sich die Erde wieder vom Eis befreien?

DROPSTONES

Der hier abgebildete Eisberg schleppt eine große Menge Gesteinsschutt mit sich. Er hat sich von einem Gletscher gelöst, der bei Spitzbergen ins Meer mündet. Eisberge werden von den Meeresströmungen oft über weite Strecken mitgenommen. Wenn sie schmelzen, fällt das im Eis eingeschlossene Geröll auf den Meeresboden. Noch nach Millionen von Jahren weisen solche „fallengelassenen Steine“ („Dropstones“) als Klimazeugen darauf hin, dass die Erde einst vergletschert war.

Kalt- und Warmzeiten haben sich im Laufe der Erdgeschichte immer wieder abgewechselt.





Im Karbon dehnten sich Sumpfwälder aus. Totes Holz konnte in den Sümpfen nicht verwesen und wurde zu Torf.



Durch Überlagerung mehrerer Schichten wurde der Torf zusammengedrückt: Es bildete sich Braunkohle.



Weitere Schichten ließen den Druck und die Temperatur so weit ansteigen, dass die Braunkohle zu Steinkohle umgewandelt wurde.

und steigt nach oben. Bei Vulkanausbrüchen gelangt dieses flüssige Gestein als Lava an die Erdoberfläche. Gleichzeitig werden große Mengen CO_2 freigesetzt.

Auch zur Zeit der Snowball-Earth waren die Vulkane auf der Erde weiter aktiv. Dadurch stieg der Gehalt an Treibhausgasen in der Atmosphäre schließlich so stark an, dass das Eis zu schmelzen begann. Durch den Rückgang des Eises wurde nun weniger Sonnenlicht reflektiert, und die Erde erwärmte sich noch stärker. Die Folge war ein klimatisches Wechselbad: Der enorme Kälteeinbruch zur Zeit der Snowball Earth wurde am Ende des Präkambriums von einer extremen Hitzewelle abgelöst, bevor sich die Temperaturen allmählich wieder normalisierten.

Im Kambrium, dem ersten Abschnitt des Erdaltertums, stellte sich ein warmes Klima auf der Erde ein, das über

200 Millionen Jahre andauerte. Nun entwickelte sich in den Meeren ein vielfältiges Leben. Allerdings muten uns diese Lebensformen heute recht altertümlich an. Daher trägt das Erdaltertum auch den Namen „Paläozoikum“: „altes Leben“. Unterbrochen wurde die lange Warmzeit nur durch eine kurze, heftige Abkühlung im Ordovizium vor etwa 440 Millio-



Risse, wie in der Wüste Namib, entstehen, wenn Böden austrocknen. Versteinerte Trockenrisse (unten) finden wir in allen geologischen Zeitaltern. Diese aus Marokko sind 500 Mio. Jahre alt.

nen Jahren. Spuren der damaligen Vereisung – versteinerte Moränen und Gletscherschiffe – finden wir in Nordafrika, das damals am Südpol lag. Das Zentrum der Vereisung befand sich in der heutigen Sahara. Viele Tiergruppen überlebten diesen Klimasturz nicht und starben aus.

Im mittleren Paläozoikum vor ca. 400 Millionen Jahren wurde auch das Festland, auf dem sich bis dahin nur Flechten,

Pilze und Moose ausgebreitet hatten, von höheren Pflanzen besiedelt. Um in die Höhe wachsen zu können, mussten die Pflanzen festes Holz ausbilden: Erste Bäume entstanden.

Durch die Photosynthese waren die sich rasch entwickelnden Pflanzen in der Lage, große Mengen von Kohlenstoff zu binden. Da Holz nicht so leicht verwest, konnten die

Wie kam es zum Artensterben im Paläozoikum?

Wann entstanden die ersten Kohlelagerstätten?



abgestorbenen Bäume und andere Pflanzen in den Sümpfen und Niederungen nun aber nicht mehr vollständig zersetzt werden: Es bildeten sich die Kohlelagerstätten, die wir heute zur Energiegewinnung abbauen. Der in den Pflanzen enthaltene Kohlenstoff blieb nun in der Steinkohle gebunden, anstatt durch Verwesungsprozesse wieder in die Atmosphäre zu gelangen. Dadurch fiel der CO_2 -Gehalt der Atmosphäre stark ab. Dies verringerte den Treibhauseffekt: Das Klima kühlte kräftig ab. Wieder breiteten sich Gebirgsgletscher und Inlandvereisungen auf der Erde aus. Während der nächsten 50 Millionen Jahre wechselten kühlere und wärmere Perioden einander ab.

Wie war das Klima zur Zeit der Dinosaurier?

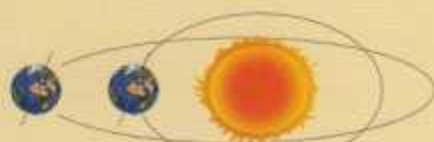
Das Erdmittelalter und der Beginn der Erdneuzeit waren wieder von warmem Klima geprägt. Besonders warm wurde es in der Kreidezeit, als Dinosaurier die Erde beherrschten. In dieser Zeit waren die Vulkane besonders aktiv: Sie

pumpten viel CO_2 in die Atmosphäre und erhöhten dadurch den Treibhauseffekt. Hinzu kam ein anderer Effekt: Die größten Vulkane der Erde liegen unter dem Meeresspiegel auf den Mittelozeanischen Rücken. Hier steigt Lava aus dem Erdinneren auf, erstarrt und bildet neue Gesteine. Dies lässt die riesigen ozeanischen Gebirge weiter wachsen. Dadurch wird Ozeanwasser verdrängt, und der Meeresspiegel steigt. In der Kreidezeit waren die untermeerischen Vulkane sehr aktiv, und die Kontinente wurden großflächig

KLIMA IN DER KREIDEZEIT

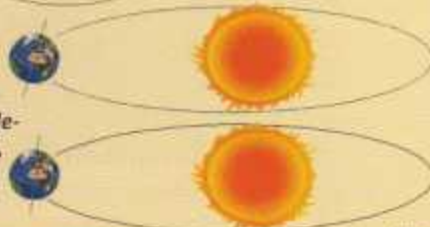
In der Kreidezeit war es so warm, dass die Gletscher an den Polen schmolzen. Dort, wo heute Eiswüsten sind, wuchsen Laubbäume. Selbst Saurier besiedelten die Polargebiete, wie Knochenfunde in der Antarktis beweisen. Die Küsten von England, Norddeutschland und Dänemark waren von Meer bedeckt. Unzählige winzige Kalkalgen wurden abgelagert und bildeten die berühmten Kreidefelsen von Dover (England), Rügen und Stevens Klint (Dänemark).

MILANKOVITCH-ZYKLEN

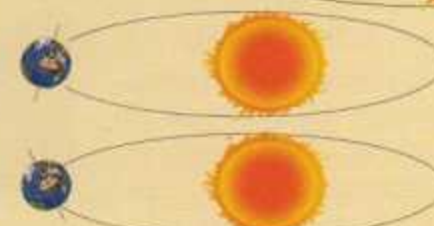


1) Die Bahn der Erde um die Sonne schwankt zwischen ellipsenförmig und fast kreisförmig. Bei Ellipsenform sind die Temperaturunterschiede zwischen den Jahreszeiten deutlicher ausgeprägt.

Die drei Effekte überlagern sich und führen zu periodischen Klimaänderungen alle 20 000, 41 000, 95 000 und 400 000 Jahre.



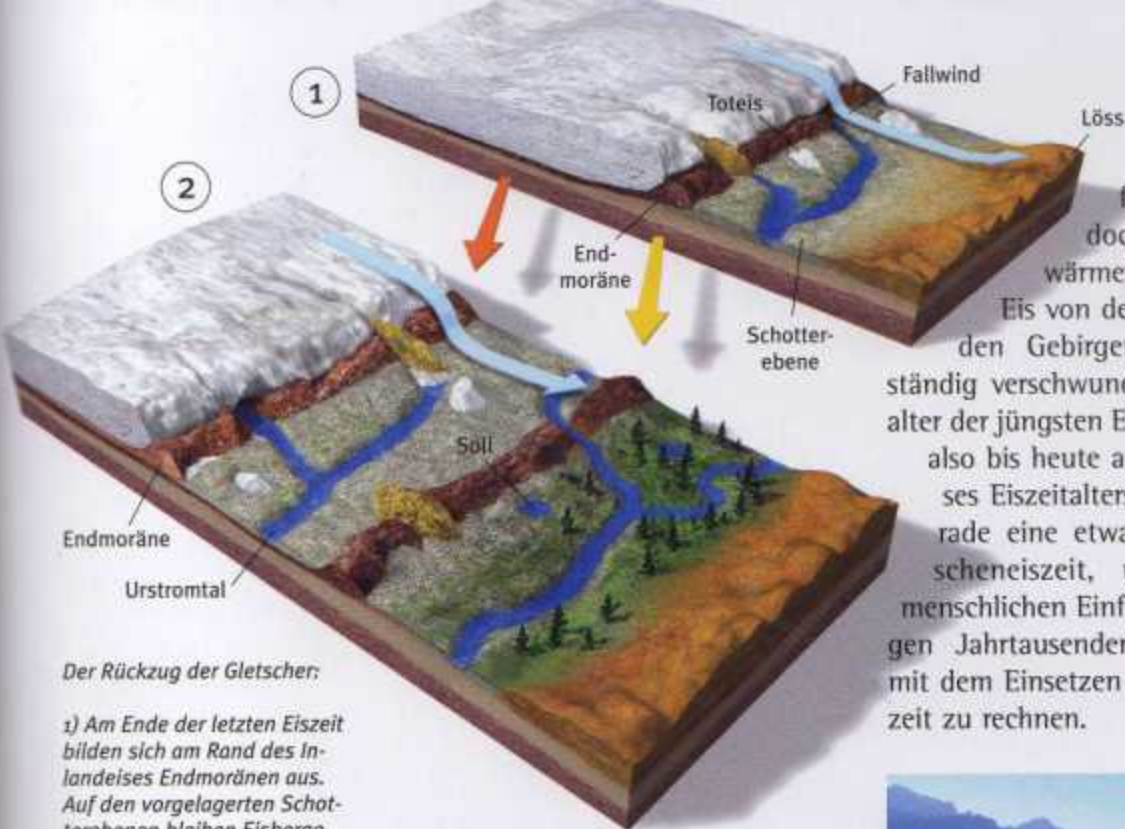
2) Die Neigung der Erdatmosphäre gegen ihre Umlaufbahn pendelt zwischen 22 und 24,5 Grad. Je steiler die Achse steht, desto geringer sind die jahreszeitlichen Unterschiede. Alle 95 000 Jahre wird die geringste bzw. höchste Neigung erreicht.



3) Schließlich taumelt die Erdatmosphäre wie ein Kreisel, der nicht senkrecht auf dem Boden steht. Dadurch verteilt sich die Sonnenstrahlung unterschiedlich auf der Erde.

Der serbische Astrophysiker Milutin Milankovitch entdeckte, dass der Wechsel von Eiszeiten und Warmzeiten in der jüngeren Erdgeschichte durch die Bewegung der Erde um die Sonne gesteuert wird. Dabei spielen besonders Änderungen im Neigungswinkel der Erdatmosphäre, die alle 95 000 Jahre auftreten, eine große Rolle: In den letzten 400 000 Jahren hat es vier Eiszeiten im Wechsel mit Warmzeiten gegeben. Zusätzlich zu den Milankovitch-Zyklen findet eine positive Rückkopplung mit den Treibhausgasen statt: Erst ändert sich die Temperatur, dann folgt die CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre und verstärkt den Effekt.

Kreideküste auf der Insel Rügen



Der Rückzug der Gletscher:

1) Am Ende der letzten Eiszeit bilden sich am Rand des Inlandeises Endmoränen aus. Auf den vorgelagerten Schotterebenen bleiben Eisberge zurück („Toteis“). Fallwinde, die über dem Eis entstehen, blasen aus den Schotterebenen feinen Staub aus und lagern ihn am Rand von Mittelgebirgen als „Löss“ ab.

2) Das Eis zieht sich weiter zurück, und es entsteht eine neue Endmoräne. Das alte Toteis schmilzt. Toteis-Löcher, sogenannte „Sölle“, bleiben zurück. Nach dem Rückzug des Eises breitet sich Vegetation aus. In dem nun wärmeren Klima können sich durch Verwitterung Böden bilden.

URSTROMTÄLER

Unsere großen Flüsse wie Elbe und Oder folgen noch heute den „Urstromtälern“, die in der letzten Eiszeit entstanden. Damals trat Schmelzwasser am Rand des Inlandeises aus und floss in den durch Endmoränen begrenzten Tälern zur Nordsee.

überflutet. Da die Oberfläche des Meeres dunkler ist als die der Kontinente, nahm die Albedo ab. Das verstärkte die Erwärmung.

Erst vor etwa 23 Millionen Jahren, in der Mitte des Tertiärs, kühlte die Erde erneut ab, und am Südpol baute sich die Eiskappe auf, die bis heute Bestand hat. Auf der Nordhalbkugel begann die Vereisung erst vor etwa 2,6 Millionen Jahren.

Leben wir heute in einem Eiszeitalter?

Seit dem Klimasturz im Tertiär ist die Erde in einem Eiszeitalter gefangen. Zwar wechselten sich Kaltzeiten und Warmzeiten oder, besser gesagt, „Eiszeiten“ (Glaziale) und „Zwischeneiszeiten“ (Interglaziale) ab. Auch gab es innerhalb der Eiszeiten immer wieder kurzfristig wärmere Zeitabschnitte. Im Gegensatz zur Kreidezeit und dem frühen Tertiär, als die Erde weitgehend eis-

frei war, ist jedoch auch in den wärmeren Perioden das Eis von den Polen und aus den Gebirgen niemals vollständig verschwunden. Das Eiszeitalter der jüngsten Erdgeschichte hält also bis heute an. Innerhalb dieses Eiszeitalters erleben wir gerade eine etwas wärmere Zwischeneiszeit, und ohne den menschlichen Einfluss wäre in einigen Jahrtausenden wahrscheinlich mit dem Einsetzen einer neuen Eiszeit zu rechnen.



Der Comer See entstand am Ende der letzten Eiszeit, als sich die Gletscher aus den Alpen zurückzogen.

Wie wirkten sich die Eiszeiten in unserem Raum aus?

In Süddeutschland kennen wir vier große Eiszeiten, die nach den Flüssen Günz, Mindel, Riss und Würm benannt sind. Während der drei letzten Eiszeiten drang das Eis von Skandinavien aus auch nach Norddeutschland und Polen vor. Auch diese Vereisungen tragen ihre Namen nach Flüssen, nämlich nach Elster, Weichsel und Saale. Zeugen der Vereisun-



Findlinge und Sölle – kleine kreisrunde Seen – sind Zeugnisse der letzten Eiszeit in der Landschaft Mecklenburgs.

gen sind Gletscherschliffe, Moränen und Findlinge, die die Landschaft besonders in Mecklenburg und im nördlichen Polen prägen.

Selbst die Mittelgebirge wie der Schwarzwald, das Fichtelgebirge, das Riesengebirge und der Harz trugen damals kleine Gletscher. So verdanken der Schluchsee und der Titisee im Schwarzwald ihre Existenz der letzten Vereisung. Auch fast alle Seen in den Alpen und am Rande der Alpen sind zu jener Zeit entstanden, zum Beispiel Genfer See, Gardasee und Comer See, und in Süddeutschland Bodensee, Ammersee, Starnberger See und Chiemsee.

Wie endete die letzte Vereisung?

Das Ende der letzten Vereisung vor rund 10 000 Jahren ging nicht gleichmäßig vonstatten. Während sich im Mittleren Westen Nordamerikas das Eis zurückzog, blieb im Osten eine Eisbarriere bestehen. Dadurch bildete sich im Gebiet von Ontariosee und Oberem See ein riesiger Eisstausee. Als die Eisbarriere durchbrochen wurde, lief der Eisstausee plötzlich leer, und der Nordatlantik wurde von Süßwasser überschichtet. Dadurch konnte sich dort kein Tiefenwasser mehr bilden, und der Golfstrom kam vorübergehend zum Erliegen. Ein kurzfristiger Kälteeinbruch war die Folge.

Auch in jüngster geologischer Zeit, aus der es bereits menschliche Aufzeichnungen gibt, war das Klima deutlichen Schwankungen unterworfen. Zur Römerzeit herrschte in Europa ein mildes Klima. Der karthagische Feldherr Hannibal konnte sogar mit seinen Kriegselefanten die Alpen überqueren, weil das Gebirge längst nicht so stark mit Eis und Schnee bedeckt war wie in späteren Jahrhunderten. Um 1400, am Ende des Mittelalters, schlug das Klima um: Es kam zur „Kleinen Eiszeit“. In Europa wurde es nun deutlich kälter. Auch in Grönland, dessen Name „grünes Land“ bedeutet und zeigt, dass es hier einmal wesentlich weniger Eis gab, drangen die Gletscher wieder vor. Viele Menschen und Tiere starben. Die meisten Bewohner verließen Grönland. Erst seit etwa 1850 wurde das Klima wieder milder.

IN FERNER ZUKUNFT ...

Das Klima der Vergangenheit und der nahen Zukunft wirft noch viele Fragen auf. Sicher ist aber, wie das Klima in einer sehr fernen Zukunft aussehen wird. Denn wir wissen, dass die Sonne sich immer mehr ausdehnt und immer stärker strahlt. Durch die so entstehende Erwärmung wird irgendwann in vielen Millionen Jahren kein Leben auf der Erde mehr möglich sein. In einigen Milliarden Jahren wird sich die Sonne dann zu einem sogenannten Roten Riesen von ungeheurer Größe aufblähen, Mars und Venus verschlingen und die Gesteinskruste unserer Erde zu einem heißen Lava-Ozean aufschmelzen.

Winterstimmung auf einem Bild des niederländischen Malers Pieter Brueghel. Es entstand im Jahr 1601 während der Kleinen Eiszeit.





ENERGIEVERBRAUCH

Licht in Europa, Dunkelheit in Afrika – ein Blick auf unseren Planeten bei Nacht zeigt, dass in den Industriestaaten deutlich mehr Energie verbraucht und damit mehr Treibhausgas ausgestoßen wird als in den Entwicklungsländern. Von den Folgen sind alle betroffen, denn die Gase verteilen sich über den ganzen Erdball.

Mensch und Klima

Kann der Mensch das Klima beeinflussen?

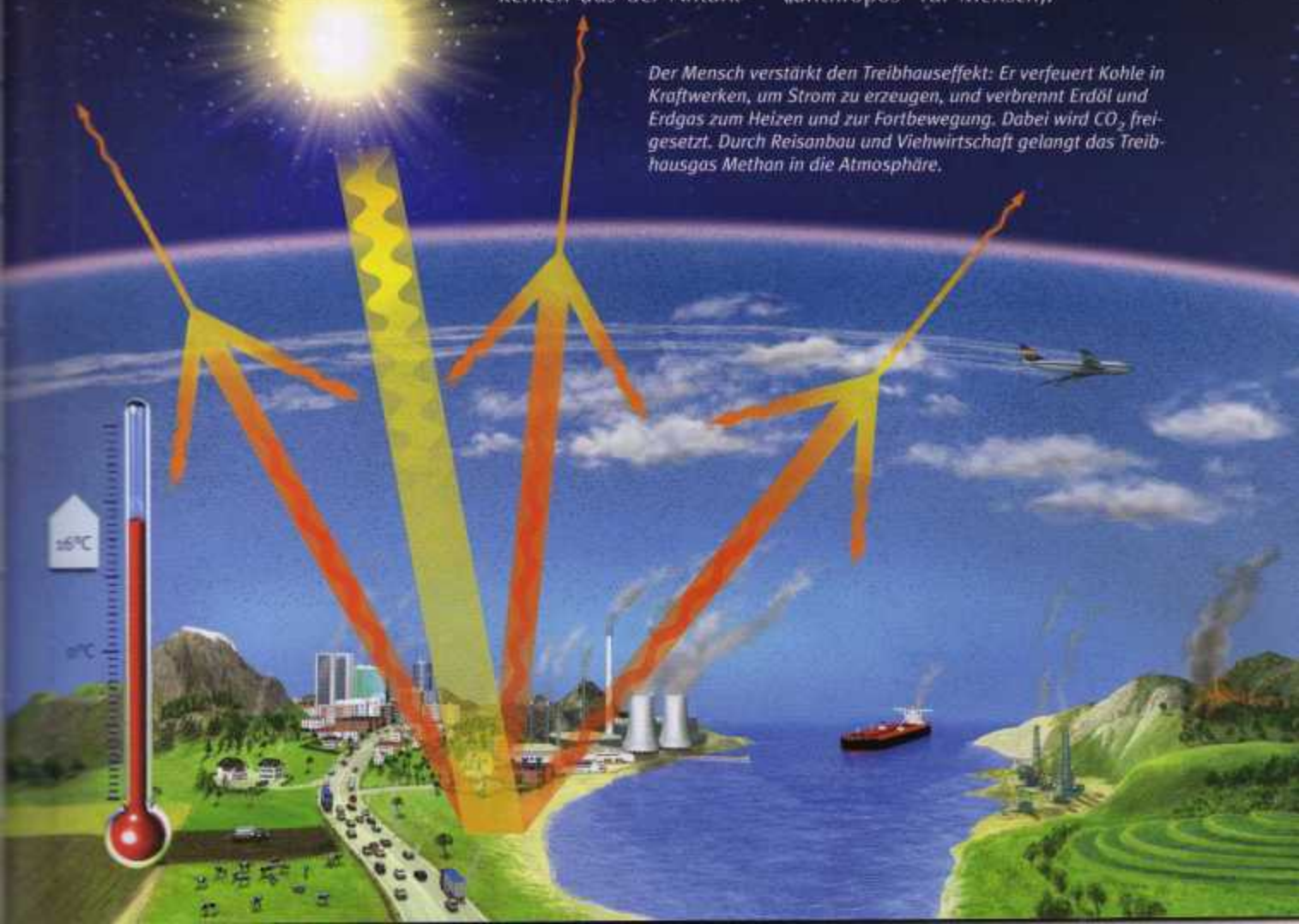
Die meisten Klimaveränderungen laufen ohne Beteiligung des Menschen ab – er kann weder die Stärke der Sonnenstrahlung noch die Umlaufbahn der Erde um die Sonne beeinflussen. Anders sieht es mit dem Treibhauseffekt aus. Die Konzentration von Spurengasen in der Atmosphäre reguliert durch den natürlichen Treibhauseffekt unser Klima. Wenn der Mensch die Menge der Spurengase in der Atmosphäre verändert, bleibt dies nicht ohne Wirkung – und genau das passiert in zunehmendem Maße.

Durch die Analyse von Luftbläschen in Eisbohrkernen aus der Antark-

tis wissen wir, wie hoch die Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre früher gewesen ist. Die Messungen haben ergeben, dass der CO_2 -Gehalt in den vergangenen Eiszeiten wesentlich niedriger war als heute, während er in den Warmzeiten etwa heutige vorindustrielle Werte erreichte. Erst in den letzten hundert Jahren ist die Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre deutlich angestiegen – und dies hat der Mensch verursacht.

Die durch den Menschen ausgelöste Erhöhung des Anteils an Treibhausgasen und die Auswirkungen auf die Atmosphäre nennt man auch „anthropogenen“ – vom Menschen gemachten – Treibhauseffekt (abgeleitet vom griechischen Wort „anthropos“ für Mensch).

Der Mensch verstärkt den Treibhauseffekt: Er verfeuert Kohle in Kraftwerken, um Strom zu erzeugen, und verbrennt Erdöl und Erdgas zum Heizen und zur Fortbewegung. Dabei wird CO_2 freigesetzt. Durch Reisanbau und Viehwirtschaft gelangt das Treibhausgas Methan in die Atmosphäre.





Die Welt vor der Industrialisierung: Arbeit war Handarbeit, Strom noch nicht in Gebrauch. Anders als früher haben wir heute Maschinen, mit denen wir uns fortbewegen oder Lasten transportieren, und elektrisches Licht steht uns jederzeit zur Verfügung.

Warum steigt der Kohlendioxid-Anteil in der Luft?

Hauptursache für den Anstieg des Kohlendioxid-Gehalts in der Atmosphäre ist die Verbrennung fossiler Rohstoffe, mit der der Mensch gegen Ende des 19. Jahrhunderts in großem Maßstab begonnen hat. Was damals passierte, wird heute als „industrielle Revolution“ bezeichnet. Die Gesellschaft veränderte sich rapide: Hatten die Menschen bis dahin vor allem Landwirtschaft betrieben, sorgte nun die Industrialisierung dafür, dass immer mehr Fabriken aus dem Boden schossen. Für die Fabriken wurde Energie benötigt, die man vor allem durch die Verbrennung von Kohle erzeugte. Dabei entsteht aber nicht

nur Wärme (also Energie), sondern als eines der „Abfallprodukte“ auch Kohlendioxid, das über die Schornsteine in die Luft geblasen wird.

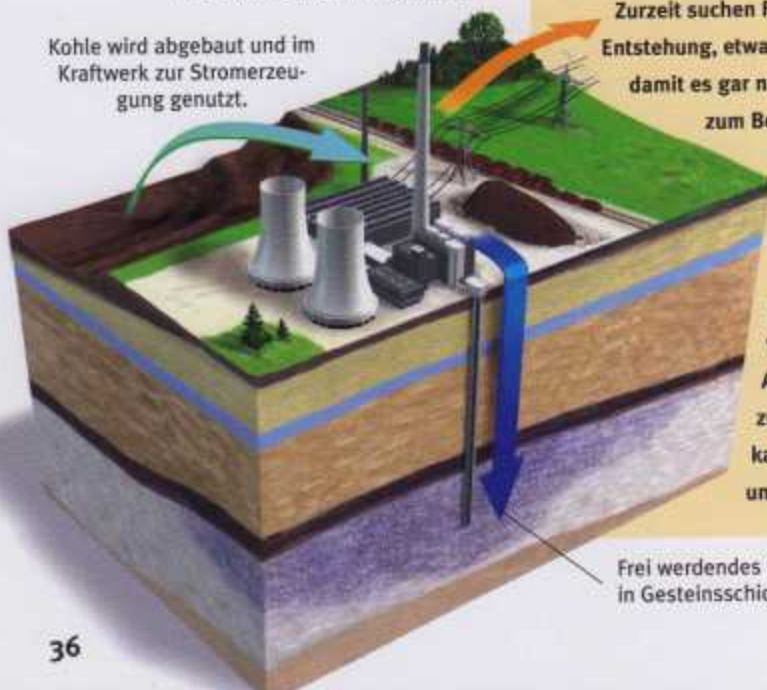
Seit Beginn der Industrialisierung stieg der weltweite Energieverbrauch immer weiter an. Neben Kohle werden dabei noch andere fossile Energieträger verbraucht, vor allem Erdöl und Erdgas. „Verbrauchen“ bedeutet dabei meistens „verbrennen“: um unsere Häuser zu heizen, um Autos und Flugzeuge zu bewegen oder um Strom zu erzeugen. Weltweit werden täglich rund 85 Millionen Barrel Rohöl verbraucht, das entspricht einer Menge von über 13 Milliarden Litern. Und wann immer ein fossiler Rohstoff verbrannt wird, setzt er Kohlendioxid frei.

CO₂-EMISSIONEN

Jahr für Jahr werden immer mehr Treibhausgase produziert: 2004 waren es weltweit rund 28 Milliarden Tonnen! Mit 5,7 Milliarden Tonnen haben die USA am meisten CO₂ ausgestoßen („emittiert“), gefolgt von China mit 4,4 Milliarden Tonnen. Mit einigem Abstand kommen Russland, Japan und Indien, die jeweils mehr als eine Milliarde Tonnen emittiert haben. Deutschland liegt mit über 800 Millionen Tonnen auf Platz sechs.

Der im Kraftwerk erzeugte Strom wird zum Verbraucher geleitet.

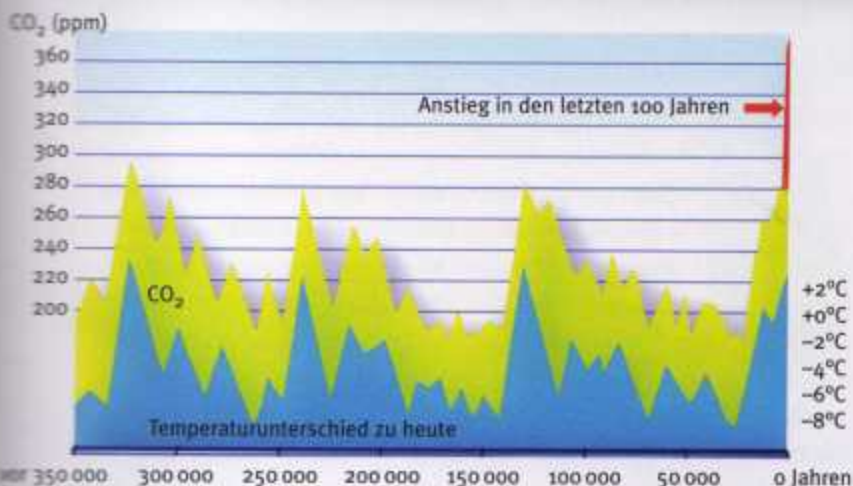
Kohle wird abgebaut und im Kraftwerk zur Stromerzeugung genutzt.



KOHLSTOFFSPEICHERUNG

Zurzeit suchen Forscher nach Möglichkeiten, Kohlendioxid bei seiner Entstehung, etwa in Kraftwerken, abzufangen und „wegzusperren“, damit es gar nicht erst in die Luft gelangt. Das Treibhausgas könnte zum Beispiel in unterirdische Lagerstätten – große Hohlräume in der Erdkruste oder tiefe Erdschichten – gepumpt werden. Allerdings stehen die Forscher bei diesem Verfahren noch ganz am Anfang, und es ist umstritten, ob die Kohlenstoffspeicherung wirklich eine Lösung ist. Denn für die Abscheidung und Lagerung von CO₂ muss sehr viel Energie aufgewendet werden. Auch steht zu befürchten, dass das Kohlendioxid nicht zuverlässig in den Lagerstätten gespeichert werden kann, sondern langsam oder sogar schlagartig entweicht und letztlich doch die Atmosphäre belastet.

Frei werdendes Kohlendioxid wird in Gesteinsschichten gespeichert.



In den letzten 400 000 Jahren schwankte der CO_2 -Gehalt der Atmosphäre stets zwischen knapp 200 und 300 ppm. Erst in den letzten 100 Jahren ist er deutlich angestiegen: auf heute 380 ppm. Die Einheit „ppm“ („parts per million“) heißt übersetzt „Teile pro Million“. 1 ppm CO_2 bedeutet also, dass sich in einer Million Atmosphäre-Teilchen ein CO_2 -Teilchen befindet.

Jedes Jahr werden rund 15 Millionen Hektar Wald vernichtet. Das entspricht etwa der Gesamtfläche der Bundesländer Bayern, Baden-Württemberg und Niedersachsen.

Wie wirkt sich die Abholzung der Wälder auf das Klima aus?

Auch durch die Abholzung der tropischen Regenwälder erhöht der Mensch die CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre. Jedes Jahr werden riesige Waldflächen vernichtet – um Holz zu gewinnen, Bodenschätze abbauen zu können oder Weideland zu schaffen. Der Verlust des Waldes ist dabei in doppelter Hinsicht ein Problem: Zum einen werden die Bäume bei

Mit der Industrialisierung kam der Fortschritt – und mit ihm wurden immer mehr klimaschädliche Treibhausgase in die Luft geblasen.

der Brandrodung einfach niedergebrannt, wobei große Mengen an CO_2 in die Luft gelangen. Zum anderen wird mit dem Wald ein wichtiger Kohlendioxidspeicher zerstört – denn ein intakter Wald nimmt bei der Fotosynthese viel Kohlendioxid aus der Luft auf und gibt dafür Sauerstoff ab.

Die steigende Kohlendioxid-Konzentration hat aufgrund des Treibhauseffekts zwangsläufig Auswirkungen auf unser Klima. Dabei gilt, etwas vereinfacht, die Regel: Wenig CO_2 – niedrigere Temperaturen und kälteres Klima, viel CO_2 – höhere Temperaturen und wärmeres Klima. Während der letzten Eiszeit vor etwa 20 000 Jahren lag die CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre bei nur 200 ppm. In der letzten großen Warmzeit vor

Wie stark wird die Temperatur weltweit ansteigen?



etwa 125 000 Jahren lag sie dagegen bei etwa 280 ppm. Heute messen wir einen Wert von 380 ppm. Wir haben also heute durch den Einfluss des Menschen eine höhere Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre als in den letzten 400 000 Jahren.

Für die vergangenen hundert Jahre haben die Klimaforscher berechnet, dass etwa 0,6 Grad Erwärmung auf das Konto des Menschen gehen, also durch die erhöhte CO₂-Produktion verursacht wurden. Doch ein weiterer Temperaturanstieg liegt noch vor uns. Denn das Kohlendioxid bleibt länger als ein Jahrhundert in der Atmosphäre gespeichert. Unser heutiger Energieverbrauch wird sich also noch sehr lange auf das Klima auswirken. Wie hoch der Anstieg genau sein wird, ist schwer vorauszusagen. Am wahrscheinlichsten ist, dass sich die Temperaturen bis zum Jahr 2100 zwischen 1,8 und 4 Grad Celsius erhöhen werden. Bei ungebremstem Ausstoß von CO₂ wäre schlimmstenfalls sogar eine Erwärmung von über 6 Grad zu erwarten.

Was passiert, wenn die Gletscher schmelzen?

Wenn die Temperaturen in den nächsten Jahrzehnten weiter steigen, wird sich unsere Umwelt verändern. Eines der Wahrzeichen Afrikas beispielsweise, der 5892 Meter hohe Kilimandscharo mit seinem schneebedeckten Gipfel, wird seine

WANDEL DER TIER- UND PFLANZENWELT

Der Klimawandel gefährdet vor allem Tier- und Pflanzenarten, die auf einen ganz speziellen Lebensraum beschränkt sind. Dazu zählen nicht nur die Eisbären der Arktis, sondern auch



Bewohner des Hochgebirges

wie Steinbock, Marmeltier und Edelweiß sowie zahlreiche Arten des tropischen Regenwalds. Sensible Ökosysteme wie Korallenriffe nehmen schon bei einem

geringen Temperaturanstieg Schaden. Bei einer Erwärmung um mehrere Grad wären vermutlich sogar bis zu einem Drittel aller Arten vom Aussterben bedroht. Tiere und Pflanzen in trockeneren Gebieten sind vor allem durch häufiger auftretende Brände gefährdet.



weiße Haube verlieren – denn das Gletschereis schmilzt. Ein ähnliches Bild zeigt sich in den Alpen: Die Gletscher schrumpfen, und viele werden noch in diesem Jahrhundert fast vollständig verschwinden.

Für die betroffenen Gebiete bringt dies viele Probleme mit sich. Die rund 5000 Gletscher in den Alpen speichern gewaltige Mengen an Trinkwasser und sind ein wichtiger Bestandteil der Wasserversorgung in dieser Region, und darüber hinaus. Auch regulieren sie den Wasserfluss vom Berg ins Tal, indem sie die Winter-Niederschläge erst nach und nach, über mehrere Monate verteilt, ins Tal leiten. Je weniger Gletscher diese Speicherfunktion übernehmen können und je mehr es im Winter aufgrund der Erwärmung regnet statt schneit, desto größere Wassermassen gelangen ungebrems in die Täler.

Die Folgen sind Hochwasser und Schlammlawinen

in den Wintermonaten und im Sommer

KRANKHEITSÜBERTRÄGER

Ein milderes Klima fördert die Ausbreitung von Stechmücken und Zecken, die gefährliche Krankheiten übertragen können. Zecken sind häufig Träger der Infektionskrankheit Borreliose und der Frühsommer-Meningoenzephalitis (FSME), einer Form der Gehirnhautentzündung. Auch die Moskitos, Überträger der Tropenkrankheit Malaria, sind auf dem Vormarsch. Weltweit sterben jährlich rund zwei Millionen Menschen an Malaria.

Eisbären sind wie zahlreiche andere Tierarten durch die Klima-Erwärmung vom Aussterben bedroht.





PERMAFROST IN GEFahr

Einen Vorgeschmack auf die Folgen des Klimawandels bekamen die Alpenbewohner im Hitzesommer 2003, als ungewöhnlich viele Felsstürze und Erdbeben zu beobachten waren. Grund: Der Permafrost-Untergrund, der im Hochgebirge für Stabilität sorgt, begann zu tauen. Fast ein Viertel der Landflächen nördlich des Äquators wird von Dauerfrostböden eingenommen. Taut der Boden, wird der harte Untergrund weich und schlammig – ein großes Problem für Siedlungen, Straßen, Eisenbahnlinien und Pipelines in Sibirien und Alaska, die heute auf Permafrostböden gebaut sind.

ausgetrocknete Flüsse, denen der Wasser-Nachschub aus den Bergen fehlt. Die Schneefallgrenze steigt, und dies wirkt sich auf die vielen Wintersportorte in den Alpen aus. Ihnen wird auch mit Schneekanonen bald nicht mehr zu helfen sein – ein großes Problem für die Menschen, die dort vom Wintersport leben.

Wird der Meeresspiegel ansteigen?

Das Schmelzwasser der Gletscher gelangt über die Flüsse ins Meer und lässt den Meeresspiegel ansteigen. Klimaforscher haben errechnet, dass das Wasser aller Gletscher der Erde für einen Anstieg um einen halben Meter sorgen wür-

Eine Landschaft verändert sich: Blick auf den Pasterze-Gletscher am Großglockner in Österreich, links im Jahr 1900, rechts 2000.

de. Das klingt nach wenig, doch es gibt ja noch weit größere Eismassen auf der Erde, die durch höhere Temperaturen bedroht sind.

Der größte gefrorene Süßwasserspeicher der Erde ist der Eisschild der Antarktis. Hier am Südpol sind rund 30 Millionen Kubikmeter Wasser in Form von Eis gebunden. Würde das Eis der Antarktis komplett schmelzen, würde der Meeresspiegel um 60 Meter ansteigen. Das Eis auf Grönland hat immerhin noch ein Volumen von drei Millionen Kubikmetern und könnte, vollständig geschmolzen, für einen weiteren Anstieg um sechs Meter sorgen.

1) Die Antarktis ist von einem bis zu 3 km dicken Eisschild bedeckt. Schneefall presst die Schichten zusammen und bringt sie zum Fließen.

2) Das Inlandeis fließt zu den Kontinentalrändern, wobei ein Teil verdunstet (3).

4) Wenn das Inlandeis das Meer erreicht, bildet es Schelfeis, von dem immer wieder Eisberge abbrechen.

5) Auf dem Meer entsteht im Winter See-Eis, das im Sommer taut.

In der Antarktis sind gewaltige Eismassen gebunden. Sie befinden sich in ständiger langsamer Bewegung.





Die Menschen in Bangladesch werden künftig noch stärker unter Überschwemmungen zu leiden haben.

Warum ist die Entwicklung schwer vorherzusagen?

Mit dem geschilderten dramatischen Anstieg ist aber nicht ernsthaft zu rechnen. Für die Entwicklung der Eisflächen spielen sehr viele Faktoren eine Rolle. Ein Beispiel: Weniger Eis auf der Erde würde die Albedo verringern, es wür-

den

Keinen Einfluss auf den Meeresspiegel hat übrigens das See-Eis der Arktis. Am Nordpol gibt es kein Festland, daher schwimmt das arktische Eis auf dem polaren Ozean. Diese Eismassen verdrängen also heute schon Meerwasser – ähnlich wie in einem Glas Wasser mit Eiswürfeln: Der Wasserspiegel im Glas bleibt immer gleich, auch wenn die Eiswürfel geschmolzen sind.

Alles in allem halten die Klimaforscher einen Anstieg des Meeresspiegels im Laufe des 21. Jahrhunderts um etwa einen halben Meter für realistisch. Doch das genügt, um Millionen von Menschen zu bedrohen – etwa in einem Land wie Bangladesch, das heute schon regelmäßig unter Überschwemmungen leidet, aber auch in vielen anderen Inselstaaten und Küstenregionen.



Stürme und Unwetter werden als Folge der Klima-Erwärmung weltweit zunehmen.

de also weniger Sonnenstrahlung reflektiert und dadurch die Erwärmung verstärkt. Höhere Temperaturen sorgen aber auch dafür, dass mehr Wasser aus den Ozeanen verdunstet. Das würde zu größeren Niederschlagsmengen auf der Erde führen. Mehr Schneefall in den Polargebieten würde aber die Eisflächen vergrößern. Dies wiederum hätte eine Erhöhung der Albedo zur Folge und würde die Erwärmung bremsen.

Wo wirkt sich der Klimawandel besonders stark aus?

In Mitteleuropa wird damit gerechnet, dass es im Winter mehr, im Sommer dagegen weniger regnet. Außerdem wird es ein zunehmendes Nord-Süd-Gefälle geben: mehr Niederschlag im Norden,

METHAN-GASHYDRAT

Unter den Permafrostböden der Arktis und am Grund der Ozeane sind riesige Mengen Methan als Gashydrate gebunden. Sie entstehen, wenn sich Wasser und Methan bei tiefen Temperaturen und hohem Druck zu einer festen weißen Substanz verbinden. An der Luft zerfallen die Hydrate rasch zu Gas und Wasser. Tauen die Böden und erwärmen sich die Meere, besteht die Gefahr, dass das hochwirksame Treibhausgas freigesetzt wird und die Erwärmung beschleunigt.



Ohne Wasser kein Leben: Zunehmende Dürren könnten in Afrika weite Landstriche unbewohnbar machen.

BEVÖLKERUNGSEXPLSION

Bis Mitte des 20. Jahrhunderts verlief die Bevölkerungsentwicklung auf der Erde einigermaßen überschaubar. Um 1700 lebten rund 500 Millionen Menschen auf der Erde, bis 1950 stieg die Zahl auf etwa 2,5 Milliarden. Seitdem geht es steil bergauf: Heute gibt es bereits 6 Milliarden Menschen und bis 2050 dürften es sogar 9 Milliarden sein. Je mehr Menschen aber auf engem Raum zusammenleben und die verfügbaren Ressourcen wie Wasser und Lebensmittel nutzen, desto dramatischer sind die Auswirkungen eines Klimawandels, der gerade in bevölkerungsreichen Ländern diese Lebensgrundlagen bedroht.

Brände vernichten nicht nur Wälder und bedrohen Siedlungen, sie sind auch für die Tierwelt in den betroffenen Gebieten eine große Gefahr.



mehr Hitze im Süden. Das erhöht je nach Ort und Jahreszeit das Risiko von Überschwemmungen oder Dürreperioden, verbunden mit steigender Waldbrandgefahr. Gletscher und Permafrostgebiete werden erheblich schrumpfen, bestimmte Krankheiten durch die Verschiebung der Klimazonen nach Norden zunehmen.

In den hoch industrialisierten Zonen der Erde – in Nordamerika, Europa, Australien und Neuseeland – wird man sich aber recht gut an den Klimawandel anpassen können. Vor großen Problemen stehen vor allem die ärmeren und bevölkerungsreichen Länder Afrikas, Südamerikas

und Asiens. Afrika wird von allen Kontinenten am stärksten betroffen sein. Hier leben noch sehr viele Menschen von Landwirtschaft und Viehzucht. Die Ausdehnung der Wüsten, Wasserknappheit und zunehmende Wetterextreme wie Dürren und Überflutungen werden zu Ernteaus-

fällen führen und viele Menschen in ihrer Existenz bedrohen. Zudem ist mit der Ausbreitung tropischer Krankheiten zu rechnen, und infolge dieser Veränderungen mit einem Rückgang des Tourismus.

Zu viel oder zu wenig Wasser wird auch das größte Problem für die Bewohner Asiens sowie zahlreicher Inselstaaten im Pazifik werden. Millionen von Menschen in den Küstenregionen sind durch einen steigenden Meeresspiegel bedroht. In anderen Gebieten Asiens, wie zum Beispiel in Teilen Indiens, werden dagegen Trockenperioden und Wasserknappheit zunehmen.

KLIMAMODELLE

Mithilfe von Computermodellen versuchen die Forscher, Vorhersagen über das Klima der Zukunft zu treffen. In diesen Klimamodellen werden alle wichtigen Klimafaktoren berücksichtigt, wie etwa Sonneneinstrahlung, Albedo, Treibhausgase und der Wärmetransport durch Winde und Meeresströmungen. Auch wenn die Modelle der Wirklichkeit nur nahekommen können, erlauben sie doch, Ursachen und Wirkungen zu erkennen. Verändert man zum Beispiel eine Größe wie die Sonneneinstrahlung, zeigt das Modell, welche Auswirkung dies auf das Klima haben wird. Die Forschungsergebnisse werden in Fachzeitschriften und bei Vorträgen auf Tagungen und Kongressen

veröffentlicht. In der Diskussion mit anderen Forschern stellt sich dann oft heraus, dass bestimmte Annahmen oder Theorien korrigiert werden müssen. Doch nur so können die Wissenschaftler ihre Modelle weiter verbessern.



Klimaschutz

Wie können wir das Klima schützen?

Viele Experten und Politiker sind sich darin einig, dass Klimaschutz nicht nur nötig, sondern auch machbar ist. Wichtig ist, dass der Temperaturanstieg in den nächsten Jahrzehnten zumindest begrenzt wird – denn stoppen oder gar umkehren lassen wird sich der Trend zu höheren Temperaturen nicht. Da es aber ein gewaltiger Unterschied ist, ob es auf der Erde künftig durchschnittlich um zwei oder um fünf Grad Celsius wärmer wird, lohnt sich jede Anstrengung.

Energiepolitik und Klimaschutz müssen „nachhaltig“ sein, das kann

man heute immer öfter hören und lesen. „Nachhaltigkeit“ bedeutet, dass wir bei Entscheidungen nicht nur die gegenwärtigen Umstände berücksichtigen dürfen, sondern auch an die Zukunft denken müssen. Ein Beispiel: Wenn heute ein neues Kohlekraftwerk gebaut wird, liefert es Energie. Das ist nur aus dem „Hier und Jetzt“ betrachtet eine gute Sache. Doch für unsere Kinder und Enkelkinder bedeutet das Kraftwerk vor allem: mehr CO_2 -Ausstoß mit den bekannten problematischen Auswirkungen auf das Klima. Wer nachhaltig plant und handelt, wird dies berücksichtigen und nach einer Lösung suchen, die für künftige Generationen nicht zur Belastung

ENDE IN SICHT

Fossile Brennstoffe sind auf der Erde nicht unbegrenzt vorhanden. Zwar ist es schwierig zu berechnen, wie lange etwa die Erdöl-Vorräte noch reichen werden. Das hängt davon ab, ob der Verbrauch so hoch bleibt wie heute, ob sich die Technik zur Förderung weiter verbessern lässt oder ob neue Erdölvorkommen entdeckt werden. Tatsache aber ist: In nicht allzu ferner Zukunft geht der Vorrat zur Neige. Auch deshalb ist es wichtig, neue Energiequellen zu erschließen.



CO₂-SENKEN

Nicht alle vom Menschen verursachten CO₂-Emissionen gelangen in die Atmosphäre: Rund ein Drittel des ausgestoßenen Kohlendioxids wird von den Ozeanen aufgenommen, ein gutes Fünftel wird von Pflanzen und Wäldern gespeichert. Das restliche Kohlendioxid belastet die Atmosphäre.

Sonne, Wind und Wasser, Biomasse und Erdwärme: Der Mensch hat begonnen, sich erneuerbare Energien zunutze zu machen. Sie können künftig einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz leisten.

wird. Das ist nicht nur die Aufgabe jedes Einzelnen, sondern auch der Politiker in aller Welt.

Um die Klima-Erwärmung zu begrenzen, fordern Experten,

Welche Rolle spielen regenerative Energien?

den CO₂-Ausstoß bis zum Jahr 2050 zu halbieren. Um dies zu erreichen, ist es vor allem wichtig, dass wir den Energieverbrauch generell verringern und bei der Energieerzeugung möglichst wenig Kohlendioxid produzieren.

Erste Schritte hin zu einer möglichst CO₂-armen Energieerzeugung sind auch im Rahmen der fossilen Brennstoffe möglich. Gas setzt beispielsweise beim Verbrennen deutlich weniger CO₂ frei als Kohle, ist also klimafreundlicher. Auch die herkömmlichen Kraftwerke lassen sich durch die Anwendung neuer Technologien verbessern. Allerdings sind uns hier Grenzen gesetzt: Kohle, Erdöl und Erdgas wird es nie CO₂-frei geben. Daher lassen sich die ehrgeizigen Klimaschutzziele allein durch Verbesserungen in diesem Bereich sicherlich nicht erreichen.



Für den Klimaschutz spielt deshalb die sogenannte erneuerbare oder „regenerative“ Energie eine wichtige Rolle. Bei ihr handelt es sich nicht um „künstlich“ (zum Beispiel durch Verbrennung) erzeugte Energie. Stattdessen zweigt der Mensch bei natürlich ablaufenden Prozessen Energie für seine Zwecke ab, zum Beispiel, indem er sich die Kraft von Sonne, Wind und Wasser zunutze macht. Anders als fossile Brennstoffe sind erneuerbare Energieträger nahezu unbegrenzt vorhanden – die Sonne etwa dürfte uns die nächsten fünf Milliarden Jahre noch zur Verfügung stehen.

Wie können wir Energie einsparen?

In den letzten Jahrzehnten war Energie billig und jederzeit verfügbar. Entsprechend verschwenderisch sind wir mit ihr umgegangen. Solange wir unsere Energie aus fossilen Rohstoffen gewinnen, bedeutet aber weniger Energieverbrauch auch weniger CO₂-Ausstoß. Daher ist Energiesparen ein wichtiges Mittel zum Klimaschutz. Hier sind vor allem die Entwicklungsabteilungen der Firmen gefordert, um zum Beispiel den Stromverbrauch von Elektrogeräten weiter zu senken oder spritsparende Automodelle zu entwickeln.

Ein wichtiges Thema ist auch die Wärmedämmung von Häusern, denn durch Heizen wird sehr viel CO₂ ausgestoßen. In modernen, gut gedämmten Häusern wird viel weniger Heizenergie verbraucht als in zugigen Altbauten. Und sogenannte Passivhäuser, die über ein spezielles Belüftungssystem und eine besonders wirksame Wärmedämmung verfügen, benötigen sogar überhaupt keine herkömmliche Heizung mehr.

ERNEUERBARE ENERGIEN

Die Energie der Sonne lässt sich auf verschiedene Arten nutzen. Im Rahmen

SOLARENERGIE

der Fotovoltaik wird sie mithilfe von Solarzellen in elektrische Energie umgewandelt. Solche Solarzellen kann man, verbunden zu „Solarmodulen“, zunehmend auf Dächern und an Hauswänden, aber auch auf Parkscheinautomaten und an elektronischen Geräten wie Uhren oder Taschenrechnern sehen. Solarzellen und der mit ihrer Hilfe produzierte Strom sind allerdings sehr teuer. In Deutschland wird zurzeit nur wenig Strom aus Solarenergie gewonnen.

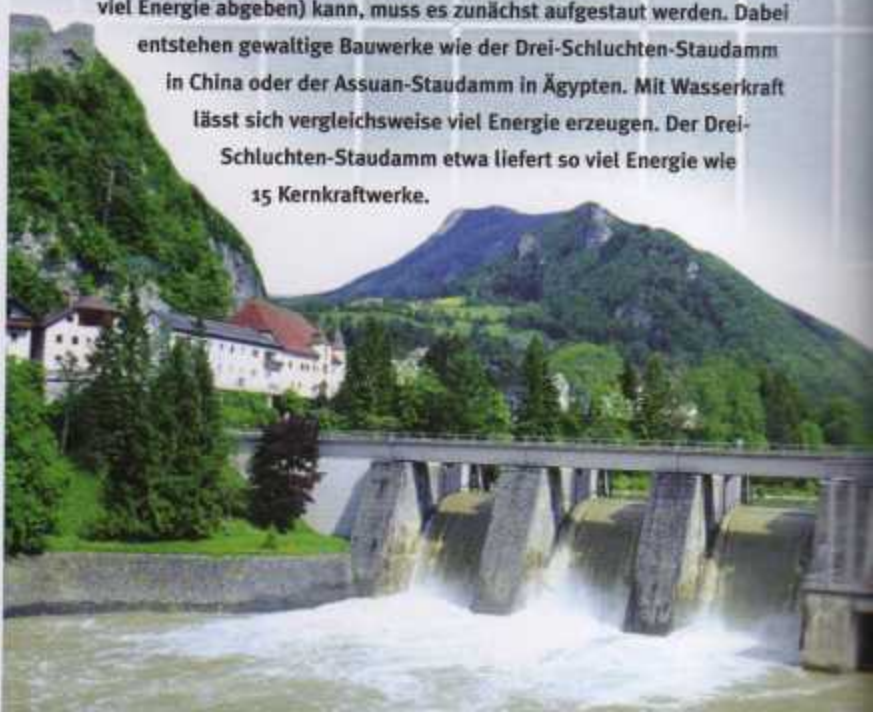
Solarwärmekraftwerke verwenden Spiegel, um das einfallende Sonnenlicht zu bündeln. Ähnlich wie man eine Lupe nutzen kann, um ein Stück Papier zu entzünden, wird im Kraftwerk mithilfe des Sonnenlichts Hitze erzeugt, die, zum Beispiel durch die Erzeugung von Wasserdampf, in elektrische Energie umgewandelt werden kann. Solarthermische Kraftwerke sind aber nur in besonders sonnenreichen Regionen sinnvoll.



Die Wasserkraft wird von den Menschen schon lange genutzt – früher zum

WASSERKRAFT

Beispiel in Mühlen. Heute wandelt man sie in Wasserkraftwerken in elektrische Energie um (unten das Kraftwerk Losenstein an der Enns). Dazu nutzt man die Bewegungsenergie des fließenden oder fallenden Wassers, die auf eine Turbine oder ein Rad übertragen wird. Damit das Wasser möglichst schnell fließen bzw. tief fallen (also viel Energie abgeben) kann, muss es zunächst aufgestaut werden. Dabei entstehen gewaltige Bauwerke wie der Drei-Schluchten-Staudamm in China oder der Assuan-Staudamm in Ägypten. Mit Wasserkraft lässt sich vergleichsweise viel Energie erzeugen. Der Drei-Schluchten-Staudamm etwa liefert so viel Energie wie 15 Kernkraftwerke.



In Deutschland werden derzeit rund vier Prozent des Stroms aus Wasserkraft gewonnen. Weltweit sind es 16 Prozent, und Norwegen deckt sogar nahezu seinen gesamten Energiebedarf mit Wasserkraft.

Immer mehr Windenergieanlagen

WINDENERGIE

zeugen von der zunehmenden Nutzung dieser

Energieform in Europa. Das Prinzip ist recht einfach: Wie bei einem Windrad oder einer Windmühle treibt der Wind einen Rotor an. Die Bewegungsenergie des Rotors wird durch einen Generator in Strom umgewandelt. In Deutschland ist die Windenergie neben der Wasserkraft die wichtigste Quelle regenerativer Energie. Weltweit ist Deutschland auch der größte Produzent von Strom aus Windkraft – vor Spanien, den USA und Indien.



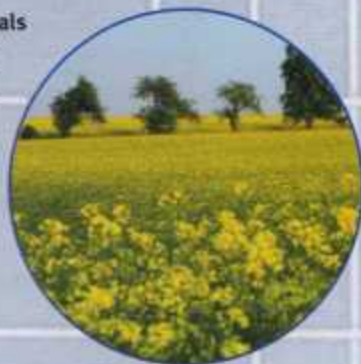
Bioenergie entsteht aus „Biomasse“. Dazu zählen nachwachsende Rohstoffe wie Holz, Mais, Zuckerrüben oder Raps. Energie wird freigesetzt, indem die Biomasse verbrannt oder vergoren wird. Dabei entsteht zwar

BIOENERGIE



Die Atomkraft oder Kernenergie zählt nicht zu den erneuerbaren Energien, da sie nicht ohne den Verbrauch von Uran auskommt – einem Rohstoff, der nicht unbegrenzt verfügbar ist. Zudem ist die Kernenergie sehr umstritten. Die Energieerzeugung birgt erhebliche Risiken, und es entstehen radioaktive Abfälle, die zu großen Problemen bei Transport und Lagerung führen. Allerdings ist die Kernkraft eine CO₂-freie Energieform, die daher zumindest als klimafreundliche Übergangslösung diskutiert wird. Oben im Bild: das Kernkraftwerk Grohnde an der Weser

auch Kohlendioxid, jedoch nicht mehr, als die Pflanzen in ihrer Wachstumsphase der Atmosphäre entzogen haben. Dies sorgt, anders als bei fossilen Rohstoffen, für eine ausgeglichene CO₂-Bilanz. Der Anteil der Stromerzeugung aus Biomasse liegt in vielen Ländern bei rund einem Prozent, so auch in Deutschland.



Geothermische Energie nutzt die in der Erdkruste ge-

GEOTHERMIE

speicherte Erdwärme. Um an sie heranzukommen, wird die Erde durch Bohrungen sozusagen „angezapft“. Sie kann dann sowohl direkt zum Heizen oder zur Erzeugung von elektrischem Strom genutzt werden. In Deutschland spielt Energie aus Erdwärme noch eine untergeordnete Rolle. Andere Länder wie Island, in denen die Erdkruste durch Vulkane sehr heiß ist, decken dagegen einen erheblichen Anteil ihres Energiebedarfs mit ihr. Rechts abgebildet ist ein isländisches Erdwärme-Kraftwerk.

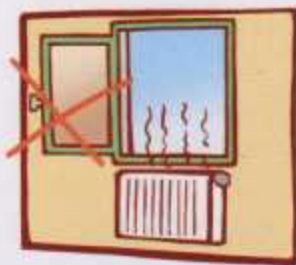


Bei all ihren Vorzügen bringen regenerative Energien aber auch Nachteile mit sich, die gegen den Nutzen für den Klimaschutz abgewogen werden müssen.

RISIKEN

Staudämme etwa machen erhebliche Eingriffe in die Landschaft notwendig. Fotovoltaikmodule liefern zwar CO₂-freien Strom; für ihre Herstellung wird aber sehr viel Energie benötigt, bei deren Verbrauch wiederum Kohlendioxid entsteht. Landwirte, die Biomasse für Kraftwerke erzeugen, bauen keine Lebensmittel mehr an. Und nicht immer ist der Anbau von Biomasse umweltfreundlich: In Malaysia etwa werden zurzeit große Flächen Regenwalds abgeholzt, um Platz für Palmöl-Plantagen zur Herstellung von Bioenergie zu gewinnen (unten).





Was ist das Kyoto-Protokoll?

Vor allem seit den 1990er-Jahren setzt sich auch bei Politikern zunehmend die Erkenntnis durch, dass der Klimawandel eine ernst zu nehmende Bedrohung für Mensch und Umwelt darstellt – und zwar auf der ganzen Welt. Der Klimawandel als globales Problem wurde daher auf mehreren von den Vereinten Nationen (UN) organisierten Weltklimakonferenzen thematisiert. Die bekannteste fand 1997 im

japanischen Kyoto statt. Im Abschlussprotokoll dieser Konferenz, dem sogenannten Kyoto-Protokoll, wurden erstmals verbindliche Zielwerte für den Ausstoß von Treibhausgasen durch den Menschen festgelegt. Die verabschiedeten Werte wurden allerdings von vielen als zu hoch kritisiert; der Klimawandel, so die Kritiker, ließe sich dadurch nicht aufhalten. Und obwohl die Ziele bescheiden sind, waren manche Länder wie die USA (immerhin weltweit der größte Treibhausgasproduzent) bisher nicht bereit, sie umzusetzen.

ENERGIESPAR-TIPPS

- „sinnvoll“ heizen, zum Beispiel während des Lüftens die Heizung abdrehen
- Obst und Gemüse aus der Region kaufen, denn es muss nicht über weite Strecken mit Auto, Flugzeug oder LKW transportiert werden
- Licht ausschalten, wenn man den Raum verlässt
- zu Fuß gehen, das Fahrrad oder öffentliche Verkehrsmittel wie Bus und Bahn benutzen
- Geräte ausschalten, nicht in Stand-by-Betrieb lassen
- auf Energiesparlampen umsteigen



Der Handel mit Emissions- oder

Verschmutzungsrechten soll die Verursacher von Treibhausgasen zur Einsparung von Kohlendioxid anregen. Es gibt ihn auf nationaler wie internationaler Ebene. So verteilt zum Beispiel die deutsche Regierung an Firmen Berechtigungsscheine („Zertifikate“), die es ihnen erlauben, eine bestimmte Menge an Kohlendioxid auszustoßen. Eine Firma, die wenig CO₂ emittiert, kann nun überschüssige Zertifikate an Firmen mit hohem

EMISSIONSRECHTEHANDEL

CO₂-Ausstoß verkaufen. Für sie zahlt sich Umweltschutz also in barer Münze aus. Auch in der Europäischen Union haben die Umweltminister 2003 einen solchen Emissionsrechtehandel eingeführt. EU-Staaten mit niedrigem CO₂-Ausstoß profitieren davon, andere mit hohem CO₂-Ausstoß müssen zahlen. Kritiker dieses Systems bemängeln, dass es hohen bürokratischen Aufwand erfordert und noch nicht erwiesen ist, ob es wirklich nachhaltig zum Klimaschutz beiträgt.



HOHE KOSTEN

Das Deutsche Institut für Wirtschaftsforschung geht davon aus, dass durch den Klimawandel allein in Deutschland bis zum Jahr 2050 Kosten in Höhe von 600 Milliarden Euro entstehen werden: um Deiche zu erhöhen, Schäden zu reparieren oder Ernteaussfälle auszugleichen. Andere Studien sagen sogar eine Weltwirtschaftskrise voraus, falls nichts gegen den Klimawandel unternommen werden sollte. Denn um mit den Folgen der Erwärmung fertig zu werden, müssten in den nächsten Jahrzehnten mehr als fünf Billionen Euro – das sind 5 000 Milliarden Euro – aufgewendet werden. Es lohnt also auch aus rein wirtschaftlicher Sicht, die globale Erwärmung so weit wie möglich zu begrenzen.

Jugendliche aus aller Welt treten bei der Klimakonferenz in Bali 2007 für Klimaschutz ein.



Was tun Städte und Gemeinden für den Klimaschutz?

Während sich also die Politiker auf globaler Ebene immer noch schwer tun, sich auf ein schlagkräftiges Programm gegen den Klimawandel zu einigen, gibt es doch „im Kleinen“ viele positive Zeichen. Bestes Beispiel dafür sind die USA: Während die Regierung des Landes zögert, machen sich einzelne Bundesstaaten den Klimaschutz zu eigen – allen voran Kalifornien, das sich als erster US-Bundesstaat dazu verpflichtet hat, den Ausstoß von Treibhausgasen zu verringern. Solche Beispiele machen immer mehr Schule: Inzwischen haben sich in den USA Hunderte Bürgermeister mit ihren Städten dem „U.S. Mayors' Climate Protection Agreement“ (Abkommen amerikanischer Bürgermeister zum Klimaschutz) angeschlossen, um gemäß dem Kyoto-Protokoll den Ausstoß von Treibhausgasen zu senken.

Und auch in Europa gibt es längst Zusammenschlüsse, die sich

dem Klimaschutz verpflichtet haben, wie etwa das Klima-Bündnis, dem mehr als 1 400 Städte, Gemeinden, Landkreise, Bundesländer und Organisationen aus vielen europäischen Ländern angehören.

Welche Aufgabe hat der Weltklimarat?

Um die Klimaforschung voranzutreiben und den Stand der Wissenschaft auf diesem Gebiet zu dokumentieren, haben die Vereinten Nationen gemeinsam mit der Weltorganisation für Meteorologie ein Expertengremium ins Leben gerufen: das IPCC, das „Intergovernmental Panel on Climate Change“ (Zwischenstaatliche Sachverständigengruppe für Klimaänderungen), auch „Weltklimarat“ genannt. An den Berichten des IPCC, die die Politiker stets über den aktuellen Stand der Forschung unterrichten sollen, arbeiten weltweit Hunderte von Wissenschaftlern mit.

Im Jahr 2007 hat der Weltklimarat gemeinsam mit dem früheren amerikanischen Vizepräsidenten Al Gore den Friedensnobelpreis bekommen. Sie wurden dafür ausgezeichnet, dass sie den Klimawandel ins Bewusstsein der Menschen gebracht und damit ein Umdenken möglich gemacht haben. Denn da das Klima ein weltweites Phänomen ist und der Klimawandel uns alle angeht, kann auch Klimaschutz nur dann erfolgreich sein, wenn alle Menschen gemeinsam daran mitwirken.

Glossar

Albedo Fähigkeit einer Oberfläche, Licht zurückzustrahlen. Helle Flächen haben eine hohe Albedo, dunkle eine niedrige.

Anthropogener Treibhauseffekt Vom Menschen verursachter Treibhauseffekt

Arides Klima Trockenes Klima

Atmosphäre Gashölle der Erde und anderer Planeten. Die Erdatmosphäre besteht aus einem Gasgemisch („Luft“) und ist durch die Schwerkraft an die Erde gebunden.

Glazial Kaltzeit im Rahmen eines Eiszeitalters

Gletscher Eisströme, die durch Ansammlung von Schnee in Gebirgen und an den Polen entstehen

Humides Klima Feuchtes Klima

Interglazial Warmzeit im Rahmen eines Eiszeitalters

IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change (Zwischenstaatliche Sachverständigengruppe für Klimaänderungen), auch Weltklimarat genannt

Klimamodell Computergestützte Berechnung, um Aussagen über das Klima in Vergangenheit und Zukunft treffen zu können

Klimazeugen Funde und Spuren, die Aussagen über das Klima in der Vergangenheit ermöglichen

Kohlendioxid Farb- und geruchloses Gas, das bei der Verbrennung von Kohlenstoff entsteht und in geringer Konzentration in der Erdatmosphäre enthalten ist

Kyoto-Protokoll Von vielen Ländern unterzeichnetes Abkommen, das den Klimaschutz durch eine Verringerung der Treibhausgase zum Ziel hat

Methan Farb- und geruchloses Treibhausgas, auch Sumpfgas genannt

Milankovitch-Zyklen Langfristig auftretende, regelmäßig wiederkehrende Klimaschwankungen, auch Eiszeitzyklen genannt. Benannt nach dem Astrophysiker Milutin Milankovitch

Monsun Jahreszeitlich wechselnde Luftströmungen, die durch die unterschiedliche Erwärmung von Land und Meer entstehen

Moräne Von einem Gletscher mitgeschleppte Gesteine unterschiedlicher Größe (Sand, Ton und Gesteinsblöcke)

Passat Tropischer Wind, der auf der Nordhalbkugel aus nordöstlicher

und auf der Südhalbkugel aus südöstlicher Richtung weht

Permafrostboden Boden, der ab einer bestimmten Tiefe ganzjährig gefroren ist, auch Dauerfrostboden genannt

Fotosynthese Prozess, der es Pflanzen ermöglicht, mithilfe von Lichtenergie zu wachsen

Fossile Rohstoffe Fossilien sind Überreste vorzeitlicher Lebewesen. Der Name „fossile Rohstoffe“ weist darauf hin, dass Kohle, Erdöl und Erdgas vor vielen Millionen Jahren aus organischen Überresten, also aus verstorbenen Tieren und Pflanzen, entstanden sind.

Spurengase Gasförmige Substanzen, die nur in geringen Spuren in der Atmosphäre vorkommen

Treibhauseffekt Erwärmung der Erde durch Treibhausgase und Wasserdampf in der Atmosphäre

Treibhausgase Spurengase wie etwa Kohlendioxid und Methan, die Wärmeenergie von der Erdoberfläche absorbieren und so zum Treibhauseffekt beitragen

Wärmekapazität Fähigkeit eines Stoffes, Wärme zu speichern

Index

A

Aerosole 9
Albedo 10
Arides Klima 9
Atmosphäre 6–8

B

Barometer 14
Bioenergie 45

D

Dichteanomalie 15
Dropstone 29–30

E

Eis 27
Eiszeit 5, 29, 33–34
Eiszeit, Kleine 34
Emissionshandel 46
Energieverbrauch 5, 35
Erneuerbare Energien 5, 43–45

F

Findling 34
Föhn 23
Fotosynthese 13, 31

G

Gemäßigte Breiten 16, 17, 19–21, 24
Geothermie 45
Gletscher 26, 33, 38
Golfstrom 24–25, 34

H

Hämatit 28
Hochdruck 14
Humides Klima 9
Hurrikan 4–5

J

Jahreszeiten 18–19

K

Kalk 12–13
Kalkriff 27
Kambrium 28, 30–31
Kernenergie 45

Klimamodell 41
Klimaschutz 42–47
Klimawandel 4–5, 40–41
Klimazeugen 26
Klimazonen 16–17
Kohle 27, 31, 32
Kohlendioxid 4, 8, 10, 12–13, 35–38
Kohlendioxid-Senke 13, 43
Kohlenstoff 12
Kontinentaldrift 29
Kontinentales Klima 22
Kreidezeit 29, 31–32
Kyoto-Protokoll 46–47

L

Löss 33
Luftdruck 14
Luftfeuchtigkeit 14–15
Lufttemperatur 14

M

Maritimes Klima 22
Meeresströmungen 24–25

Methan 4, 8, 10, 40
Milankovitch-Zyklen 32
Monsun 22–23
Moräne 26, 30, 33

N

Nebel 9, 15
Niederschlag 15

O

Ordovizium 28, 30
Ozon 8, 11
Ozonloch 8
Ozonschicht 7, 8

P

Paläozoikum 30, 31
Passatwinde 20, 21, 24–25
Permafrostboden 21, 27, 39
Polargebiete 17, 19, 21, 25
Präkambrium 28, 30

Q

Quartär 29, 31

R

Raureif 15
Rückkopplung, positive 11

S

Snowball Earth 30, 31
Solarenergie 44
Sonne 6, 8, 29–30, 34
Sonnenflecken 6–7
Spurengas 8, 11, 12
Stadtklima 19
Steinkohle 31, 32
Stratosphäre 7–8, 11
Strömungszellen 19–21
Stromatolith 28–29
Strukturboden 27
Subtropen 16, 19–21

T

Tertiär 29, 31
Tiefdruck 14
Treibhauseffekt 11–12, 35
Treibhausgas 4–5, 10, 11–12, 35
Trockenrisse 27, 31

Tropen 16–17, 19–20
Tropfsteine 13, 27
Troposphäre 7–8

U

Urstromtäler 33

V

Verdunstungswärme 15
Vulkane 13, 31, 32

W

Wärmekapazität 21–22
Wasser 9
Wasserdampf 9–10, 12
Wasserkraft 44
Weltklimarat 47
Wetter 5
Wind 14, 21–22
Windenergie 45
Wolken 9, 15
Würgeboden 27

Z

Zirkulation, globale 19
Zirkulation, thermohaline 24, 25

Kaum ein Tag vergeht, an dem in den Medien nicht über Klima und Klimawandel berichtet wird. Warum ändert sich das Klima? Ist der Mensch am Klimawandel schuld? Und können wir etwas dagegen tun? Solchen und ähnlichen Fragen gehen die Autoren **Professor**

Dr. Werner Buggisch und **Christian Buggisch** in diesem WAS IST WAS-Buch nach. Sie erklären, welche Kräfte das Klima auf der Erde beeinflussen, warum der Treibhauseffekt so wichtig ist und welche Folgen es hat, wenn der Mensch in das natürliche Klimageschehen eingreift. Auch werfen sie einen Blick in die Vergangenheit – denn Klimawandel hat es in der langen Geschichte der Erde immer wieder gegeben.



In dieser Reihe sind bisher erschienen:

- | | | | | |
|------------------------------------|---|--|---|---------------------------|
| Band 1 Unsere Erde | Band 27 Pferde | Band 53 Das Auto | Band 79 Moderne Physik | Band 101 Unser Kosmos |
| Band 2 Der Mensch | Band 28 Akustik | Band 54 Die Eisenbahn | Band 80 Tiere – wie sie sehen, hören und fühlen | Band 102 Demokratie |
| Band 3 Energie | Band 29 Wissenschaften | Band 55 Das alte Rom | Band 81 Die sieben Weltwunder | Band 103 Wille |
| Band 4 Chemie | Band 30 Insekten | Band 56 Ausgestorbene und bedrohte Tiere | Band 82 Gladiatoren | Band 104 Weltreligionen |
| Band 5 Entdecker und ihre Reisen | Band 31 Säure | Band 57 Vulkane | Band 83 Hähnen | Band 105 Burgen |
| Band 6 Die Sterne | Band 32 Meereshunde | Band 58 Die Wikinger | Band 84 Mumien aus aller Welt | Band 106 Flugzeuge |
| Band 7 Das Wetter | Band 33 Pilze | Band 59 Katzen | Band 85 Wale und Delfine | Band 107 Das Gehirn |
| Band 8 Das Mikroskop | Band 34 Wüsten | Band 60 Die Kreuzzüge | Band 86 Elefanten | Band 108 Das alte China |
| Band 9 Der Urmensch | Band 35 Erfindungen | Band 61 Pyramiden | Band 87 Türme und Vulkankrater | Band 109 Tiere im Zoo |
| Band 10 Fliegerei und Luftfahrt | Band 36 Polargebiete | Band 62 Die Germanen | Band 88 Ritter | Band 110 Die Gene |
| Band 11 Hunde | Band 37 Computer und Roboter | Band 63 Fotografie | Band 89 Menschaffen | Band 111 Tierschutz |
| Band 12 Mathematik | Band 38 Säugtiere der Vorzeit | Band 64 Die alten Griechen | Band 90 Der Regenwald | Band 112 Europa |
| Band 13 Wilde Tiere | Band 39 Magnetismus | Band 65 Eiszeiten | Band 91 Brücken und Tunnel | Band 113 Feuerwehr |
| Band 14 Versunkene Städte | Band 40 Vögel | Band 66 Geschichte der Medizin | Band 92 Papageien und Sittiche | Band 114 Elfen |
| Band 15 Dinosaurier | Band 41 Fische | Band 67 Die Völkerwanderung | Band 93 Die Olympischen Spiele | Band 115 Musikinstrumente |
| Band 16 Planeten und Raumfahrt | Band 42 Indianer | Band 68 Natur | Band 94 Samsara | Band 116 Bauernhof |
| Band 17 Licht und Farbe | Band 43 Schmetterlinge | Band 69 Fossilien | Band 95 Hais und Rochen | Band 117 Wälder |
| Band 18 Der Wilde Westen | Band 44 Die Bibel, Das Alte Testament | Band 70 Das alte Ägypten | Band 96 Schatzsuche | Band 118 Getriebe |
| Band 19 Bienen, Wespen und Ameisen | Band 45 Mineralien und Gesteine | Band 71 Piraten | Band 97 Zauberer, Hexen und Magie | Band 119 Pelz |
| Band 20 Reptilien und Amphibien | Band 46 Mechanik | Band 72 Reptilien | Band 98 Kriminalistik | Band 120 Schlangen |
| Band 21 Der Mond | Band 47 Elektronik | Band 73 Spinnen | Band 99 Sternbilder und Sternzeichen | Band 121 Biologie |
| Band 22 Die Zeit | Band 48 Luft und Wasser | Band 74 Naturkatastrophen | Band 100 Multimedia und virtuelle Welten | Band 122 Pilze |
| Band 23 Architektur | Band 49 Sport | Band 75 Fahren und Fliegen | Band 101 Geübte und ungeübte Phänomene | Band 123 Bergbau |
| Band 24 Elektrizität | Band 50 Der menschliche Körper | Band 76 Die Sonne | | Band 124 Klima |
| Band 25 Schiffe | Band 51 Muscheln, Schnecken, Tintenfische | Band 77 Tierwanderungen | | |
| Band 26 Wildblumen | Band 52 Briefmarken | Band 78 Geld | | |

ISBN 978-3-7886-1512-3



3/08



Europreis [D]

www.tessloff.com
www.wasistwas.de

