

Karl-Heinz Ludwig

Eine kurze Geschichte des Klimas

Von der Entstehung
der Erde bis heute

C·H·Beck

C·H·Beck

PAPERBACK

Seit der Industriellen Revolution dreht der Mensch immer stärker am Thermostat des komplexen Klimasystems. Dabei ist er selbst ein Produkt von Prozessen, die ganz wesentlich von den klimatischen Bedingungen auf der Erdoberfläche bestimmt wurden. Inzwischen ist er im Begriff, zunehmend den Part eines Akteurs zu übernehmen, der sich der Folgen seines Handelns bewußt ist.

Auf der Basis der Erkenntnisse aus der Klimaforschung schildert das Buch die Geschichte des Klimas von der Entstehung der Erdatmosphäre bis zum gegenwärtigen Klimawandel und beschäftigt sich in seinen letzten Kapiteln auch mit Klimaprognosen sowie der Zukunft des Planeten Erde. Verfaßt wurde es in der Absicht, den Blick zu öffnen für die Fülle der Wechselwirkungen zwischen Phänomenen, die üblicherweise völlig unterschiedlichen wissenschaftlichen Disziplinen zugeordnet werden, aber allesamt das beeinflussen, was wir unter dem Begriff «Klima» zusammenfassen.

Karl-Heinz Ludwig, geb. 1946, ist Autor und Wissenschaftsjournalist. Neben Büchern zu aktuellen Themen schreibt er Beiträge u. a. für die *Frankfurter Allgemeine Zeitung*, *Die Zeit*, die *Neue Zürcher Zeitung* sowie das ZDF.

Karl-Heinz Ludwig

Eine kurze Geschichte des Klimas

Von der Entstehung der Erde bis heute

C.H.Beck

Mit 10 Abbildungen

1. Auflage (in der Beck'schen Reihe). 2006
2., durchgesehene Auflage (in der Beck'schen Reihe). 2007
Die 3. Auflage dieses Buches wurde vollständig überarbeitet
und ergänzt.

Originalausgabe

- 3., vollständig überarbeitete Auflage in C.H.Beck Paperback. 2021
© Verlag C.H.Beck oHG, München 2021
Umschlagentwurf: malsyteufel, Willich
Umschlagabbildung: © gülsah edis + thomas meyer
Satz: Fotosatz Amann, Memmingen
ISBN Buch 978 3 406 76660 2
ISBN eBook (epub) 978 3 406 76661 9
ISBN eBook (PDF) 978 3 406 76662 6

*Die gedruckte Ausgabe dieses Titels erhalten Sie im Buchhandel
sowie versandkostenfrei auf unserer Website*

www.chbeck.de.

*Dort finden Sie auch unser gesamtes Programm und viele
weitere Informationen.*

*Jeder stirbt,
aber keiner ist tot.*

Für Chee-Ming

Inhalt

- 1 Vom Wetter zum Klima 9
 - 2 Es werde Luft 14
 - 3 Klima und Leben 25
 - 4 Klima und Evolution im Erdaltertum 32
 - 5 Klima und Evolution im Erdmittelalter 46
 - 6 Vom Treibhaus zum Eishaus 56
 - 7 Klima und die Evolution der Primaten 69
 - 8 Klima und Evolution im Pliozän 77
 - 9 Klima und die Evolution des Menschen im Eiszeitalter 90
 - 10 Klima und Mensch im Holozän 109
 - 11 Klimaentwicklung seit der Industriellen Revolution 127
 - 12 Klimawandel und Klimaschutz 150
 - 13 Klimaforschung und Klimaprognosen 175
 - 14 Die Zukunft des Planeten Erde 201
 - 15 Erde, Klima, Leben und der Pakt mit dem Teufel –
Ein Epilog 209
-
- Dank 235
 - Abbildungsnachweis 237
 - Register 239

1 *Vom Wetter zum Klima*

In diesem Kapitel erfahren Sie,

- was die Erdatmosphäre ist und was davon die Luft,
- was der Unterschied ist zwischen Wetter und Klima,
- welche Faktoren das Klima bestimmen.

Blick von oben

Von einem Raumschiff in 300 Kilometer Höhe sieht man mit bloßem Auge über der gekrümmten Horizontlinie der Erdkugel als königsblauen Saum die irdische Atmosphäre. Als er dieses wunderbare Bild zum ersten Mal sah, berichtet der deutsche Astronaut Ulf Merbold, sei er ein bißchen erschrocken darüber, wie hauchdünn diese Schicht ist, denn sie ist es, die als Schutzfilter vor tödlichen Strahlen aus dem Weltall das Leben auf der Erde erst möglich macht.

Atmosphäre

Ein durch die Anziehungskraft der Erde festgehaltenes Gemisch aus Gasen, dessen erdnächste und daher dichteste Schicht die Luft ist, die wir atmen, bildet die Atmosphäre. Sie ist zwischen 1000 und 3000 Kilometer dick, doch nur bis in eine Höhe von etwa 500 Kilometern ist das Schwerefeld der Erde stark genug, um die Gase zu halten. Jenseits dieser Grenze entweichen sie ins All.

Wettersphäre

Der hauchdünne Saum, von dem Ulf Merbold spricht, ist also lediglich der unterste, Troposphäre genannte Teil der Atmosphäre. Sie ist über dem Äquator ungefähr 18, über den Polen sogar nur etwa 7 Kilometer dick, verglichen mit der Größe der Erde also kaum dicker

als beim Apfel die Schale. Nur in ihr gibt es Dunst, Wolken sowie diverse Schwebstoffe und Mikroorganismen in ausreichender Konzentration, um das Licht für das menschliche Auge erkennbar zu reflektieren. Da sich in ihr die meisten Stürme und mit der Bewölkung verbundenen sichtbaren Wettervorgänge abspielen, bezeichnet man sie auch als «Wettersphäre».

Wetter

«Wetter» nennt man in der Meteorologie den kurzfristigen Zustand der Troposphäre an einem bestimmten Ort zu einer bestimmten Zeit. Es wird beschrieben durch Zustandsgrößen wie Temperatur, Sonnenstrahlung, Luftdruck, Windgeschwindigkeit und Windrichtung, Bewölkung, Luftfeuchtigkeit, Sichtweite sowie Art und Menge von Niederschlägen. Diese Wetterelemente werden in weltweit verteilten Wetterstationen nach internationalen Standards beobachtet und gemessen. Die so gewonnenen Daten werden dann an zentrale Wetterdienste übermittelt und dort aus größeren Gebieten zusammengefaßt, um die aktuelle Wetterlage zu ermitteln und das Wetter für die nächste Zeit vorherzusagen. Großwetterlagen sind Wetterlagen über Großräumen wie Europa oder Ostasien. Der über einen Zeitraum von einigen Tagen beobachtete Wetterablauf heißt Witterung.

Klima

Das Wort «Klima» stammt aus dem Griechischen. Ursprünglich bezeichnete es die Neigung der Erde vom Äquator aus gegen die Pole, später dann die sich nach dem Grad dieser Neigung richtende Wärme oder Witterung.

Als «Klima» bezeichnet man heute im Gegensatz zum Wetter den charakteristischen Ablauf des Wetters an einem Ort oder in einem bestimmten geographischen Raum über lange bis sehr lange Zeiträume hinweg, mindestens aber über Jahrzehnte. Dabei ist unter Klima nicht einfach eine Art «durchschnittliche» Witterung zu verstehen, denn es schließt nicht nur die Mittelwerte der Wetterelemente ein, sondern auch die Häufigkeit von Extremen und ihre Ver-

änderlichkeit. Es berücksichtigt also auch kleinere und größere Schwankungen im Verlauf von Jahrzehnten, Jahrhunderten, ja sogar Jahrtausenden (Klimavariabilität). Klima ist somit zeitabhängig und gilt folglich immer nur für bestimmte, genau definierte Zeiträume. Für die standardisierte Auswertung weltweit erhobener Klimadaten zur Berechnung der Klimaelemente hat die Weltorganisation für Meteorologie jeweils dreißigjährige Beobachtungszeiträume festgelegt, sogenannte Normal- oder Standardperioden. Es sind dies die Zeiträume von 1901–1930, 1931–1960, 1961–1990, 1991–2020 usw. Gegenwärtig befinden wir uns somit am Anfang der Normalperiode von 2021 bis 2050. Diese Festlegung dient der besseren Vergleichbarkeit klimatologischer Daten und bietet die Grundlage für globale Klimakarten, die in Weltklimaatlantent zusammengeführt werden. Allerdings ist diese Standardisierung nicht starr. Je nach den Erfordernissen bestimmter klimatologischer Forschungsziele werden auch kürzere oder längere Perioden festgelegt. Die Klimaelemente, deren sich die Klimatologie dabei bedient, sind im wesentlichen die gleichen wie die Wetterelemente der Wetterforschung, allerdings über längere Zeiträume beobachtet und beurteilt.

Klimafaktoren

Anders als die zur Beschreibung unterschiedlicher Klimata herangezogenen Klimaelemente dienen die Klimafaktoren der Erklärung der Klimaphänomene. Zu ihnen zählt eine Fülle von weltweit wirkenden Klimamachern wie Erddrehung und Sonnenstrahlung sowie von lokalen Faktoren wie die geographische Breite, die Höhe über dem Meer, die unterschiedlichen Arten der Erdoberfläche wie Wasser und Land und deren Gestalt wie Berge, Täler und Ebenen. Zu solchen geophysikalischen Faktoren treten noch Phänomene wie die Kontinentalverschiebung oder Vorgänge in den höheren Regionen der Atmosphäre jenseits der Troposphäre, durch deren Zusammenwirken nicht nur die Luft ständig verwirbelt wird, sondern auch Meeresströmungen entstehen und sich verändern. Hinzu kommen biologische Faktoren wie die Vegetation, chemische wie die Zusammensetzung der Atmosphäre und – seitdem die Menschen die Erde immer stärker bevölkern und mit technischen Mit-

teln verändern – anthropogene, das heißt menschengemachte Faktoren. Letztere vor allem sind es, welche die Entwicklung des Klimas immer stärker beeinflussen, und das in einem Maße, daß sie womöglich alles Leben auf Erden und damit am Ende unsere eigene Existenz bedrohen.

Luft

Die Luft, die wir atmen, ist nur ein Teil der Erdatmosphäre. Sie ist eine Mischung aus im wesentlichen zwei Gruppen von Gasen, von denen die eine fast konstante Mengen enthält, während die Konzentrationen der anderen in Raum und Zeit wechseln. So klein die Mengen der variablen Gruppe gegenwärtig auch zu sein scheinen, so sind sie doch von größter Bedeutung für den Fortbestand des Lebens auf der Erde. Wasserdampf beispielsweise ist nicht nur die Quelle aller Niederschläge, sondern absorbiert und emittiert ebenso wie Kohlendioxid auch Infrarotstrahlung. Kohlendioxid spielt überdies eine wichtige Rolle bei der pflanzlichen Photosynthese. Ozon wiederum, das hauptsächlich in Höhen zwischen 10 und 50 Kilometern vorkommt, absorbiert die Ultraviolettstrahlung der Sonne und schirmt auf diese Weise die Erde wirksam ab gegen alle Strahlen mit Wellenlängen von weniger als 290 Nanometer ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$).

Tabelle 1: Trockene Luft setzt sich heute zusammen aus

Art des Gases	Volumenanteile in Prozent
a) <i>konstante Gruppe:</i>	
Stickstoff (N ₂)	78,084
Sauerstoff (O ₂)	20,946
Argon (Ar)	0,934
Neon (Ne)	0,0018
Helium (He)	0,000524
Methan (CH ₄)	0,0002
Krypton (Kr)	0,000114
Wasserstoff (H ₂)	0,00005
Distickstoffoxid oder Lachgas (N ₂ O)	0,00005
Xenon (Xe)	0,0000087
b) <i>variable Gruppe:</i>	
Wasserdampf (H ₂ O)	0-7
Kohlendioxid (CO ₂)	0,01-0,1
Ozon (O ₃)	0-0,01
Schwefeldioxid (SO ₂)	0-0,0001
Stickstoffdioxid (NO ₂)	0-0,000002

2 *Es werde Luft*

In diesem Kapitel erfahren Sie,

- wie die Erde entstand,
- wie sich die Erdatmosphäre bildete,
- welche Schichten die Atmosphäre aufweist,
- wie die Ozonschicht die Erde schützt,
- was ein Treibhauseffekt ist.

Titan

Nach sieben Jahren Flug an Bord der amerikanischen Sonde Cassini landete die europäische Raumsonde Huygens am 14. Januar 2005 auf der Oberfläche des Saturn-Mondes Titan. Titan, von dem holländischen Astronomen Christiaan Huygens (1629–1695) am 13. März 1655 entdeckt, nimmt unter den Monden unseres Sonnensystems eine Sonderstellung ein: Er ist der einzige, der von einer dichten, planetenähnlichen Atmosphäre umgeben ist. Wie bereits frühere Messungen mit Hilfe von Infrarot- und Radiowellen ergeben hatten, die jetzt bestätigt wurden, besteht sie hauptsächlich aus Stickstoff und Methan sowie aus Argon 40, Ammoniak und Spuren komplexer Moleküle wie Kohlenwasserstoffverbindungen. Damit enthält sie Bestandteile organischer Substanzen, weist also Ähnlichkeiten auf mit der zweiten Atmosphäre der Erde vor rund 4 Milliarden Jahren. Möglicherweise könnten daher von der Huygens-Sonde gesammelte Daten Aufschluß darüber geben, wie das Leben auf der Erde entstand.

Erforschung der Geschichte der Erdatmosphäre

Die Erforschung der Entstehung der Erdatmosphäre ist nicht zuletzt deshalb schwierig, weil Atmosphären aus Gasen bestehen und Gase sich im Laufe der Zeit verflüchtigen. Anders als in anderen

Gebieten der Erdgeschichte verfügen Wissenschaftler, die sich mit der Atmosphäre beschäftigen, somit über nichts, woran sie wie an Steinen oder Fossilien unmittelbar ablesen könnten, welchen Veränderungen diese in der Vergangenheit unterworfen waren, und sind daher methodisch auf Schlußfolgerungen angewiesen.

Daß dies möglich ist, ist erstens der Tatsache zu verdanken, daß feste Himmelskörper größtenteils dieselben chemischen Verbindungen aufweisen wie Gase, wobei der Unterschied lediglich auf unterschiedlichen Druck- und Temperaturverhältnissen beruht: Aufgrund der – dank ihrer starken Schwerkraft – im Innern herrschenden hohen Drücke geht die Materie dort vom gasförmigen in den flüssigen bzw. festen Aggregatzustand über, während sie im äußeren Bereich wegen des dort schwächeren Schwerefeldes gasförmig bleibt. Dies erklärt auch, warum nicht alle Himmelskörper eine Atmosphäre besitzen, sondern nur solche, deren Anziehungskraft stark genug ist, um die Gase zu halten. Und dies ist sowohl beim Titan der Fall als auch bei der Erde.

Der zweite Grund ist, daß Gase infolge ihrer geringen Dichte ständig in Bewegung sind und daher in Gestalt von Winden und Stürmen verändernd auf die feste Materie einwirken. Die auf diese Weise durch Erosion geprägte Oberfläche der Himmelskörper erlaubt wiederum Rückschlüsse auf frühere Zustände.

Die Entstehung unseres Sonnensystems

Die meisten Astronomen gehen heute davon aus, daß unser Sonnensystem aus einer rotierenden Gas- und Staubwolke entstanden ist. Als sich vor rund 5 Milliarden Jahren die Materie im Zentrum dieses Sonnenebels durch die Gravitation verdichtete und infolgedessen immer heißer wurde, bis sie schließlich durch Kernfusion Energie zu erzeugen begann, bildete sich die Sonne. Die restliche sowie die von der jungen Sonne abgestoßene überflüssige Materie nahm die Gestalt einer Scheibe an, die sich dann in Ringe aufteilte. Die in diesen Ringen enthaltenen Teilchen ballten sich zunächst zu kleinen und dann zu immer größeren Klumpen zusammen. Als vor etwa 4,6 Milliarden Jahren einige dieser Klumpen genug Masse und damit Schwerkraft gewonnen hatten, um selbst Materie anzuziehen,

formten sich aus den sonnennahen Ringen die vier inneren Gesteinsplaneten Merkur, Venus, Erde und Mars, aus den sonnenfernen Ringen die vier äußeren Gasplaneten Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun. Eine Ausnahme bildete Pluto. Er besteht aus den Überresten der von den Gasplaneten nicht gebundenen Materie.

Die Uratmosphäre

Ursprünglich hatten alle Planeten Gase des Sonnennebels eingefangen und waren daher von Atmosphären umgeben. Während die großen äußeren Planeten diese mittels ihrer starken Schwerefelder bis heute halten konnten, verloren die inneren Planeten ihre hauptsächlich aus Wasserstoff und Helium bestehenden Uratmosphären, als die junge Sonne begann, mit hoher Geschwindigkeit Plasmaströme aus Elektronen und Protonen auszustoßen: Einem atomaren Gebläse gleich fegte der Sonnenwind ihre Gashülle in den interplanetaren Raum. Die heutige Erdatmosphäre kann somit nicht aus der Uratmosphäre hervorgegangen sein, ihr Ursprung muß vielmehr in der Erde selbst liegen.

Die zweite Atmosphäre

Dank ihrer großen Masse und infolge der Einschläge zum Teil riesiger Körper, deren kinetische Energie sich dabei in Wärme umwandelte, wurde die Erde gegen Ende ihrer Entstehung so heiß, daß ihr Gestein bis in große Tiefen schmolz. Derart verflüssigt, konnten sich nun alle Stoffe nach ihrem spezifischen Gewicht entmischen, sodaß in der Mitte ein fester, von einem flüssigen Äußeren umgebener Eisenkern entstand, während die leichteren Stoffe nach außen wanderten, wo sie den Erdmantel und darüber den Vorläufer der heutigen Erdkruste bildeten. Im Verlauf und als Teil dieses Differentiation genannten Prozesses drangen auch große Mengen flüchtiger Substanzen an die Oberfläche und wurden schließlich als Gase freigesetzt. Bei fortschreitender Erstarrung der Erdoberfläche begann – als Folge der langsamen Abkühlung – zu dieser «Entgasung» vor etwa 4,5 Milliarden Jahren zunehmend auch Vulkanismus beizutragen. Die so entstandene zweite, durch die Schwerkraft der

Erde festgehaltene Atmosphäre war genaugenommen nichts anderes als der gasförmige Teil der Erdkruste und bestand im wesentlichen aus Wasserstoff, Wasserdampf, Methan, molekularem Stickstoff (N_2), Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Ammoniak, Schwefelwasserstoff und molekularem Wasserstoff (H_2). Sie war äußerst lebensfeindlich und enthielt, wenn überhaupt, nur sehr geringe Mengen freien Sauerstoff.

Allein durch Differentiation läßt sich nach Ansicht zahlreicher Wissenschaftler weder das Vorhandensein sämtlichen Wassers noch die Entstehung des Eisenkerns hinreichend erklären.

Im Universum kommt Wasser zwar häufig vor, in flüssiger Form – eine wesentliche Voraussetzung für Leben – außer an unserem blauen Planeten wurde es jedoch bisher an der Oberfläche keines anderen Himmelskörpers nachgewiesen. Da in jüngster Zeit immer mehr Planetologen annehmen, daß allein durch Entgasung aus dem Erdinneren stammendes Wasser für das Entstehen der Ozeane nicht ausgereicht haben kann, gehen diese davon aus, daß es größtenteils von Einschlägen extraterrestrischer Objekte aus dem äußeren Sonnensystem stammt.

Eines dieser Objekte dürfte der Mehrzahl der Wissenschaftler zufolge ein etwa marsgroßer Asteroid gewesen sein, der vor etwas mehr als 4,5 Milliarden Jahren mit der noch jungen Erde kollidiert ist und ihr dabei nicht nur große Mengen Wasser gebracht hat, sondern dessen Eisenkern infolge des Aufpralls schmolz und sich mit dem noch flüssigen Eisenkern der Erde vereinigte.

Vor allem aber muß durch die Wucht des Einschlags eine Unmenge glühenden Gesteins ins All geschleudert worden sein, wobei sich aus dem in der Erdumlaufbahn verbliebenen Teil innerhalb relativ kurzer Zeit der Mond gebildet hat. Der Umstand, daß der nach der griechischen Mutter der Mondgöttin Theia genannte Asteroid die Erde nur schräg und nicht in der Mitte getroffen hat, erklärt den Drehimpuls, der Erde und Mond noch heute rotieren läßt – wenn auch deutlich langsamer als zu Beginn.

Die dritte Atmosphäre

Während sich die Erde mit ihrer neuen, zweiten Atmosphäre allmählich abkühlte und sich infolge des Wechsels des Aggregatzustands von Wasserdampf zu flüssigem Wasser Ozeane bildeten, bewirkte der äußerst hohe Anteil vor allem an Kohlendioxid einen Treibhauseffekt: Die durch die Sonnenstrahlung auf die Erde gelangte Wärme wurde zurückgehalten und verhinderte so trotz des durch die Atmosphäre stark getrübbten Lichtes eine Vereisung der Meere. Hinzu kam, daß in der Frühphase der Erde ein höherer Atmosphärendruck herrschte als heute, das «Temperaturfenster» für flüssiges Wasser also wesentlich größer war als 100°C , beispielsweise zwischen -5 und $+160^{\circ}\text{C}$ bei einem Druck von 5 bar.

Da sich der Wasserstoff bei fortschreitender Abkühlung der Erde verlangsamt in den Weltraum verflüchtigte, verringerte sich allmählich sein Anteil an der Atmosphäre. Zugleich gelangte sehr viel Kohlendioxid mit dem Regen über die Flüsse in die Meere, wo es mit Wasser und Metallen – dabei vor allem mit Kalzium – chemische Verbindungen einging, die dann in unlöslichen Kalkablagerungen der Erdkruste gebunden wurden. Durch die fortgesetzte, bis heute andauernde vulkanische Freisetzung von Gasen trat jedoch immer neues Kohlendioxid aus, sodaß sich sein Anteil an der Atmosphäre – und damit der Treibhauseffekt – weniger reduzierte, als es ohne diese Zufuhr geschehen wäre.

Das veränderte die zweite Atmosphäre so sehr, daß man mit einigem Recht sagen kann, daß sich bis vor etwa 4 Milliarden Jahren eine dritte Atmosphäre entwickelt hatte, die aus der ersten hervorgegangen war, ohne daß sich eine scharfe Trennlinie zur zweiten ziehen ließe.

Die heutige, vierte Atmosphäre

Von der dritten unterscheidet sich die heutige Atmosphäre nicht nur dadurch, daß sie infolge der Bindung des Kohlendioxids in Kalkgesteinen (sowie in Erdöl, Kohle und Erdgas) nur noch sehr geringe Reste dieses Gases enthält, sondern vor allem durch die hohen Anteile (Volumen-Prozent in trockener Luft) von Stickstoff (rund

78 Prozent) und Sauerstoff (fast 21 Prozent). Da die Atmosphäre ursprünglich so gut wie keinen Sauerstoff enthalten hatte, ist die Frage, woher dieser kam. Die Antwort lautet: Sauerstoff ist ein Produkt lebender Organismen, die sich vor etwa 4 Milliarden Jahren auf der Erde zu entwickeln begannen, was zu einer sich wechselseitig bedingenden Evolution des Klimas und des Lebens führte.

Die Schichtung der Erdatmosphäre

Der Gasmantel, der die Erde umgibt, ist keine gleichmäßig aufgebaute Hülle, sondern gliedert sich vertikal in mehrere deutlich unterscheidbare, wenn auch nicht scharf voneinander abgrenzbare Schichten. Infolge der Schwerkraft ist er in der Nähe der Oberfläche am dichtesten, wird mit zunehmender Höhe dünner und geht an seinem äußeren Rand fließend in den Weltraum über.

Zunächst unterscheidet man zwischen der bis in etwa 110 Kilometer Höhe reichenden *Homosphäre*, in der die Zusammensetzung der Atmosphäre nahezu homogen ist, da sich ihre Stoffe dank der hier herrschenden Turbulenzen vermischen, und der darüber liegenden *Heterosphäre*, in der sich die Gase entsprechend ihrer Atomgewichte entmischen. Die leichteren Gase entweichen dabei in die oberen Schichten, bis in einer Höhe von über 1000 Kilometern nur noch Wasserstoff vorkommt. Die Übergangszone zwischen Homo- und Heterosphäre bezeichnet man als *Turbopause*, als Bereich, in dem die Turbulenzen aufhören.

Weitere Ursachen für die Schichtung sind vor allem die Temperaturabhängigkeit chemischer Prozesse und die je nach Dichte und Zusammensetzung der Atmosphäre unterschiedliche Durchlässigkeit für bestimmte Strahlen. Danach gliedert man die Atmosphäre in folgende Temperaturzonen:

→ *Troposphäre*

Die Troposphäre, die als «Wettersphäre» schon im Kapitel «Vom Wetter zum Klima» eine Rolle spielte, ist die unterste und dichteste Schicht. Ihre Obergrenze schwankt je nach Jahreszeit und geographischer Breite. So liegt sie am Äquator zwischen 16 und 18 und an den Polen zwischen 8 und 12 Kilometern Höhe. Obwohl sie die

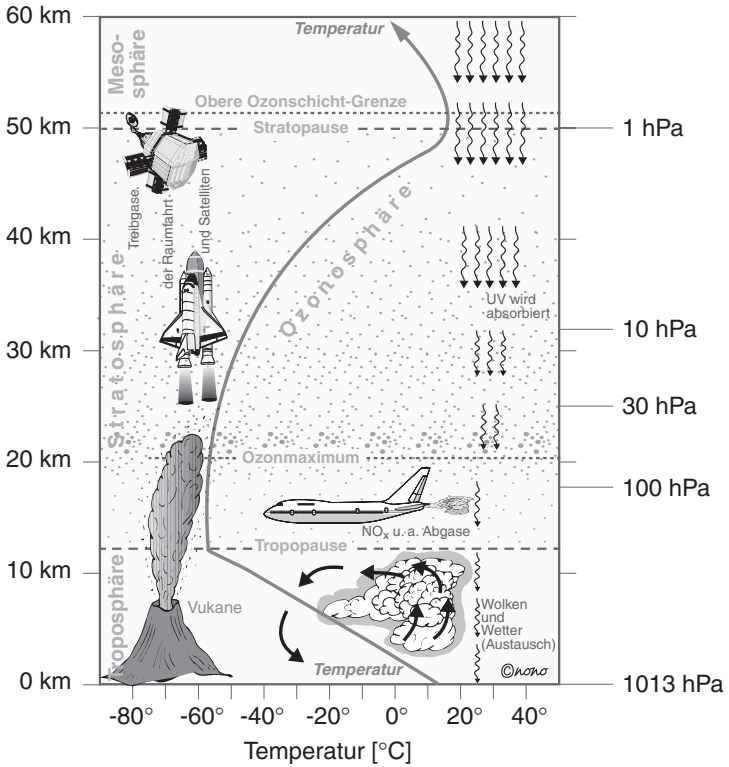


Abb. 1: Der Stockwerkaufbau der Atmosphäre, hPa = Luftdruck in Hektopascal

dünnste aller Schichten der Atmosphäre ist, enthält sie fast 90 Prozent der gesamten Luft sowie des Wasserdampfes.

Erwärmt wird die Troposphäre hauptsächlich von der Erdoberfläche. Deshalb nimmt ihre Temperatur nach oben hin ab, und zwar um durchschnittlich 6,5 °C pro 1000 Höhenmeter. Da warme Gase nach oben steigen, kalte jedoch absinken, bewirken diese Temperaturunterschiede eine Zirkulation der Luft, die Grundlage allen Wettergeschehens. Aus dem in der Luft enthaltenen Wasser-

dampf bilden sich Wolken, in denen der Dampf kondensiert und Regen entstehen läßt. Den oberen Bereich der Troposphäre zwischen 9 und 18 Kilometer Höhe bildet die Tropopause. Hier herrschen Temperaturen zwischen etwa -50°C an den Polen und -80°C am Äquator.

→ *Stratosphäre*

Während die Temperatur in der Troposphäre mit zunehmender Höhe sinkt, bleibt sie in der trockenen und daher nahezu wolkenlosen Stratosphäre zunächst gleich, nimmt weiter oben aber allmählich wieder zu. Dieser Temperaturanstieg auf teilweise über 0°C in der Stratopause, dem oberen Bereich der Stratosphäre in etwa 50 Kilometer Höhe, ist die Folge des gleichzeitigen Auf- und Abbaus von Ozon (O_3): Die energiereiche, kurzweilige UV-Strahlung der Sonne setzt hier aus Sauerstoffmolekülen (O_2) Sauerstoffatome (O) frei, die sich mit O_2 zu O_3 verbinden. Durch Absorption der UV-Strahlung zerfällt das Ozon zwar sofort wieder, doch indem sich die freien Sauerstoffatome sogleich erneut an molekularem Sauerstoff anlagern, kommt es zu einem Gleichgewicht innerhalb der die Erdoberfläche vor den Leben gefährdenden UV-Strahlen schützenden Ozonschicht.

→ *Mesosphäre*

An die Stratopause grenzt die Mesosphäre, in der die Temperatur bei zunehmender Höhe wieder abnimmt, bis sie in der Mesopause in 85 Kilometer Höhe mit -100°C die tiefsten Werte erreicht. Es ist die kälteste Schicht der Atmosphäre. Die Anteile an Sauerstoff, Stickstoff und Kohlendioxid entsprechen weitgehend denen unmittelbar an der Erdoberfläche. Allerdings enthält die Mesosphäre mehr Ozon als die unteren Schichten, jedoch kaum Wasserdampf in Gestalt von Wolken aus Eiskristallen.

→ *Thermosphäre*

In der auf die Mesopause folgenden Thermosphäre, die bis in eine Höhe von etwa 500 Kilometern reicht, kann die Temperatur durch die Röntgenstrahlung der Sonne in Zeiten starker Sonnenaktivität auf weit über 1000°C steigen. Ein Großteil dieser Hitze wird nach

unten abgeleitet, um dann in der Nähe der Mesopause in den Welt-
raum abgestrahlt zu werden.

→ *Exosphäre*

Über der Thermopause schließlich kommt die Exo- oder auch Dis-
sipationssphäre genannte äußerste Schicht. Da das Schwerefeld der
Erde hier bereits so schwach ist, daß es die Moleküle der Gase nicht
mehr recht zu halten vermag, entweichen sie von hier ins All. In
welchem Maße dabei Materie verlorengeht, ist ausschlaggebend da-
für, ob die Erde ihre Atmosphäre behält.

Der natürliche Treibhauseffekt

Die heutige Erdatmosphäre ist sehr durchlässig für das Sonnen-
licht. Allerdings ist das für das menschliche Auge sichtbare Licht
nur ein Teil der elektromagnetischen Wellen, die sich ähnlich aus-
breiten wie Wasserwellen unterschiedlicher Länge und Frequenz.
Die Wellenlängen von UV-Strahlen liegen im kurzwelligen Bereich
jenseits des sichtbaren Lichts. Nur ein geringer Teil der UV-Strah-
lung gelangt auf die Erdoberfläche, und auch nur der mit Wellen-
längen über etwa 290 nm. Die für das Leben auf der Erde schädliche
starke UV-Strahlung unter 290 nm wird in etwa 20 bis 35 Kilometer
Höhe durch die Ozonschicht der unteren Stratosphäre sehr wirk-
ungsvoll absorbiert.

Während die Atmosphäre die Erde also weitgehend vor der UV-
Strahlung schützt, ist sie durchlässig für das sichtbare Licht, das
daher bis zur Erdoberfläche durchdringt und sie erwärmt. Die so
gewonnene Wärmeenergie wird jedoch von der Erde in Gestalt von
Infrarotstrahlung teilweise wieder in den Weltraum abgegeben. Daß
diese Rückstrahlung nicht vollständig erfolgt, ist vor allem dem in
der Atmosphäre enthaltenen Wasserdampf und Kohlendioxid sowie
Methan und einigen anderen Spurengasen zu verdanken. Sie absor-
bieren die Infrarotstrahlen und werfen sie als Wärme zurück, die
damit in den untersten Schichten der Atmosphäre und an der Erd-
oberfläche gefangen bleibt wie in einem Treibhaus, dessen Glasdach
zwar Licht herein-, Wärme aber nicht hinausläßt. Ohne Wasser-
dampf und Kohlendioxid in der Atmosphäre gäbe es diesen natür-

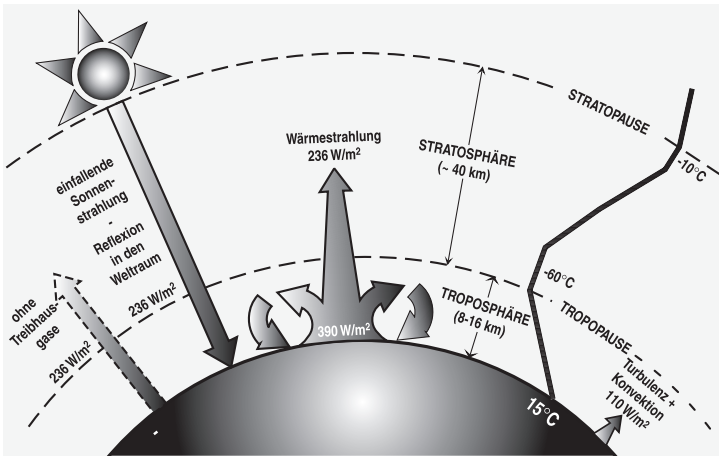


Abb. 2: Der natürliche Treibhauseffekt der Erde

lichen «Treibhauseffekt» nicht. Die mittlere Temperatur der Erde läge ohne einen natürlichen Treibhauseffekt nicht wie heute bei ungefähr $+15^{\circ}\text{C}$, sondern bei nur etwa -18°C , nach manchen Berechnungen womöglich sogar noch niedriger. Damit aber wäre es für das Leben auf der Erde zu kalt.

Elektromagnetische Strahlung

Die Frequenz ist die Häufigkeit der Schwingungen pro Sekunde, die Wellenlänge der Abstand zwischen zwei Wellenbergen. Die Wellenlängen bestimmen die Farben des Lichts. Diese lassen sich sichtbar machen, indem man weißes Licht, das durch Überlagerung aller Wellenlängen der sichtbaren Strahlung entsteht, mit Hilfe eines Prismas, das die einzelnen Strahlen entsprechend ihrer Wellenlängen seitlich ablenkt, in seine Spektralfarben zerlegt. Das Licht mit der größten Wellenlänge erscheint dabei rot, das mit den kürzesten violett. Jede Strahlenquelle sendet ein für sie typisches Gemisch vieler verschiedener Wellenlängen aus, ihr Spektrum. Die Zusammensetzung eines Spektrums hängt ab von der

Temperatur seiner Quelle, wobei von Körpern mit extrem hoher Oberflächentemperatur wie der Sonne eine Menge energiereicher Ultraviolettstrahlen ausgeht.

Strahlengruppen (Auswahl)	Wellenlängen
Infrarot-(IF-)Strahlung	ca. 800 nm–1 mm
Sichtbares Licht	ca. 700 nm–400 nm
Ultraviolett-(UV-)Strahlung	ca. 380 nm–10 nm

1 Nanometer ist 1 Millionstel eines Millimeters ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$)

3 *Klima und Leben*

In diesem Kapitel erfahren Sie

- nicht, was Leben ist, aber
- was die Grundbausteine des Lebens sind und wie sie vermutlich entstanden,
- wie der Sauerstoff in die Atmosphäre und das Eisen in den Boden kam,
- wie sich die Ozonschicht bildete und
- warum es auf der Erde so kalt wurde, daß das Wasser gefror.

Was ist Leben?

So einfach die Frage scheint, so schwer ist sie zu beantworten. Daher sollen hier lediglich einige wesentliche Merkmale genannt werden, durch die sich Organismen von unbelebter Materie unterscheiden. Allen voran sind dies die Fähigkeiten:

- als Einzelwesen Stoffe aufzunehmen, auszutauschen und chemisch umzuwandeln,
- sich fortzupflanzen sowie
- sich als Gattungswesen zu entwickeln und neuen Umweltbedingungen anzupassen.

Das Wesen des Lebens beruht also vermutlich auf übergeordneten Organisations- bzw. Ordnungsprinzipien. Diese aber können an dieser Stelle nicht Gegenstand der Betrachtung sein.

Die Bausteine lebender Stoffe

Alle Materie, belebte wie unbelebte, besteht aus Atomen. Atome sind die kleinsten Teilchen mit den charakteristischen Eigenschaften eines chemischen Elements. Es sind die chemischen Grundbausteine der Welt.

99 Prozent des Universums einschließlich aller Organismen sind gebildet aus den sechs Elementen Wasserstoff, Helium, Kohlenstoff, Stickstoff, Sauerstoff und Neon. Da die Zusammensetzung lebender Stoffe zwischen der mittleren Zusammensetzung des Universums und der der heutigen Erde liegt, stellt sich die Frage, ob das Leben entstand, als der chemische Aufbau der Erde dem des Kosmos noch ähnlicher war, und sich die Zusammensetzung der Erde erst später verändert hat. In diesem Fall müßte es schon in einem sehr frühen Stadium der Erdgeschichte Leben gegeben haben.

Die Ursprünge des Lebens

Die ältesten Gesteinsschichten, in denen sich Hinweise auf die Existenz von Mikroorganismen finden, sind rund 3,8 Milliarden Jahre alt. Das Leben muß also entstanden sein, als die Erde kaum älter war als 700 Millionen Jahre. Damals enthielt die Atmosphäre außer Wasser und Stickstoff vor allem Kohlendioxid, Schwefelwasserstoff, Kohlenmonoxid und Wasserstoff sowie Spuren von Ammoniak und Methan, aber keinen oder fast keinen freien Sauerstoff. Diese Zusammensetzung entspricht ungefähr dem Gemisch heutiger vulkanischer Gase. Wie die chemische Analyse nur wenig jüngeren, kohlenstoffhaltigen Gesteins zeigt, müssen relativ bald darauf einzellige Lebewesen den Kohlenstoffkreislauf der Erde bestimmt haben.

Wenngleich wir nicht wirklich wissen, wie das Leben entstand, ist es wahrscheinlich, daß es sich als Folge einer durch Zufuhr von Energie in Gestalt energiereicher Strahlung, elektrischer Entladungen in Blitzen, sehr hoher Temperaturen und Drücken ausgelösten Kette chemischer Reaktionen gebildet hat. Kohlenstoff spielte dabei die zentrale Rolle, weil kein anderes Element eine solche Fülle verschiedener chemischer Verbindungen in Gestalt langkettiger oder ringförmiger Moleküle einzugehen vermag. Wie Stanley L. Miller (1930–2007) 1953 in einem Experiment nachwies, bei dem er die Bedingungen der damaligen Atmosphäre im Labor simulierte, lassen sich Aminosäuren sogar auf recht einfache Weise herstellen. Diese «organisch» genannten Moleküle auf Kohlenstoffbasis, aus denen sich später Makromoleküle wie Nukleinsäuren und Proteine, das