

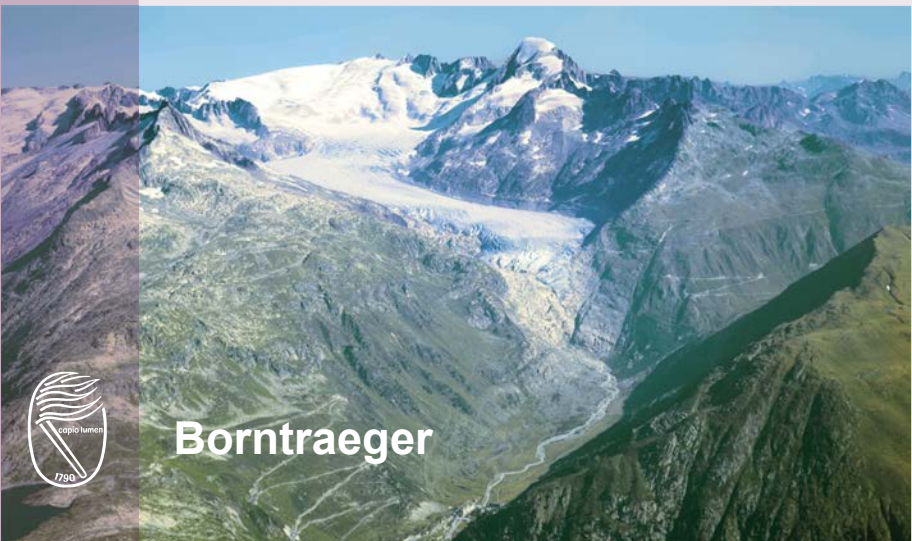


Christian-D. Schönwiese

Klimawandel kompakt

3. aktualisierte
Auflage

Ein globales Problem
wissenschaftlich erklärt



Borntraeger

Christian-D. Schönwiese

Klimawandel kompakt

Ein globales Problem
wissenschaftlich erklärt

3. aktualisierte Auflage

Mit 34 Abbildungen und 11 Tabellen



Borntraeger • Stuttgart 2020

Schönwiese: Klimawandel kompakt
Ein globales Problem wissenschaftlich erklärt

Prof. Dr. Christian-D. Schönwiese
Goethe-Universität
Institut für Atmosphäre und Umwelt
Postfach 11 19 32
60054 Frankfurt a.M.

Gerne nehmen wir Hinweise zum Inhalt und Bemerkungen zu diesem Buch entgegen:
editors@schweizerbart.de

Abb. auf der Umschlagvorderseite: Entwicklung des Rhönegletschers zwischen 1860 und 1970. Mit freundlicher Genehmigung von Professor Martin Funk, ETH Zürich.

3. Auflage: Borntraeger, 2020
2. Auflage: Borntraeger, 2019
1. Auflage: Borntraeger, 2019

ISBN 978-3-443-01169-7

ISBN ebook (epdf) 978-3-443-01172-7

Information on this title: www.borntraeger-cramer.de/9783443011697

© 2020 Gebr. Borntraeger, Stuttgart, Germany

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt besonders für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Verlag: Gebr. Borntraeger Verlagsbuchhandlung, Johannesstr. 3A, 70176 Stuttgart, Germany
mail@schweizerbart.de
www.borntraeger-cramer.de

♻ Gedruckt auf alterungsbeständigem Papier nach ISO 9706-1994
Satz und Herstellung: Gebr. Borntraeger Verlagsbuchhandlung, Stuttgart

Vorwort zur 3. Auflage

Es freut mich sehr, dass dank der sehr interessierten und aufgeschlossenen Aufnahme dieses Buchs nun schon die 3. Auflage erscheinen kann. Nachdem ich mich in der 2. Auflage (Spätherbst 2019) im Wesentlichen auf Korrekturen und formale Präzisierungen beschränkt habe, ist die vorliegende 3. Auflage gründlich überarbeitet, insbesondere aber umfassend aktualisiert und somit auf den neuesten Stand gebracht. Sowohl hier als auch schon hinsichtlich der 2. Auflage danke ich meinen Lesern, Rezensenten und Kollegen sehr für hilfreiche Verbesserungsvorschläge sowie sonstige Hinweise und Anmerkungen. Die Kooperation mit dem Borntraeger-Verlag war wiederum hervorragend, wobei ich besonders Herrn Dr. Nägele und Frau Zeusche hervorheben möchte. Ich hoffe, dass dieses Buch weiterhin möglichst vielen Interessierten und Engagierten als umfassende und doch kompakte Basis für streng wissenschaftliche und aktuelle Information dienen kann; denn trotz vieler anderer Probleme wie zur Zeit die Corona-Epidemie darf das Problem des Klimawandels nicht aus den Augen verloren werden. Im Gegenteil: Es wird immer wichtiger, ganz besonders auch dann, wenn wir nicht bald wesentlich entschlossener als bisher mit sinnvollen und wirksamen Maßnahmen reagieren.

Frankfurt a.M./Oberursel, im Juni 2020
Christian-Dietrich Schönwiese

Vorwort zur 1. Auflage

Warum ist der Klimawandel nicht nur ein heißes Diskussionsthema in der Wissenschaft, sondern auch in der Öffentlichkeit? Die Antwort auf diese Frage ist offensichtlich: Zum einen ist die Menschheit fatal von der Gunst des Klimas abhängig. Das zeigen uns nicht nur die unwirtlichen Hitze- und Kältewüsten der Erde, sondern auch Extremereignisse in unserer gemäßigten Klimazone wie Hitzewellen, Dürren und Starkniederschläge. Es kann uns daher nicht gleichgültig sein, was mit unserem Klima geschieht. Zum zweiten nimmt die Menschheit immer mehr Einfluss auf das Klima. Daraus erwächst uns eine besondere Verantwortung, und das ganz besonders auch für unsere Kinder und viele weitere künftige Generationen. Dieser Verantwortung müssen wir uns stellen und entsprechend handeln.

Doch die Voraussetzung dafür ist, dass jeder von uns den Klimawandel wenigstens in den wichtigsten Aspekten kennt und versteht. Dabei ist es meines Erachtens eminent wichtig, sich nicht auf den anthropogenen, also von der Menschheit verursachten Klimawandel zu beschränken, sondern alles zu beleuchten, was seit der Entstehung der Erde bedeutsam ist; denn je nach zeitlicher und räumlicher Größenordnung sind die Ursache-Wirkung-Mechanismen sehr unterschiedlich. Und selbst im Anthropozän bzw. Industriezeitalter, in dem die Menschheit zweifellos immer mehr die Natur und das Klima beeinflusst, steht der anthropogene Klimawandel in Konkurrenz zu natürlichen Vorgängen, die es immer gegeben hat und auch in Zukunft immer ge-

ben wird. So habe ich schon 1979 mein erstes populärwissenschaftliches Buch zum Gesamtthema „Klimaschwankungen“ geschrieben¹¹. Auf den anthropogenen Klimawandel hat allerdings schon lange vor mir der schwedische Physikochemiker Svante Arrhenius hingewiesen (1896)².

Zudem verlangt das Thema Klimawandel Sachlichkeit. Emotionen und Kraftausdrücke sind hier fehl am Platz (vgl. dazu meinen Beitrag „Zwischen Katastrophe und Schwindel – Anmerkungen zur Klimadebatte“, Universitas, 1997¹³). Dieser guten Tradition, im Kontext mit der überaus zahlreichen seriösen Fachliteratur, fühle ich mich auch hier verpflichtet. Daher versuche ich in diesem Buch, möglichst kurz, aber informativ und auf streng wissenschaftlicher Basis, den Klimawandel als Gesamtproblem vorzustellen und verständlich zu machen. Dazu gehört auch die Tatsache, dass der anthropogene Klimawandel „nur“ quantitativ unsicher ist, aber nicht prinzipiell. Wer seine Informationen nur aus den Medien bezieht, findet neben gutem Journalismus leider auch vieles, was falsch bzw. verwirrend ist. Beispielsweise ist immer wieder zu lesen, Methan (CH_4) sei klimawirksamer als Kohlendioxid (CO_2). Dabei wird verschwiegen, dass dieses „Treibhauspotential“ nur pro Molekül gilt. Berücksichtigt man u.a. die viel höhere Konzentration und somit viel größere Zahl von CO_2 -Molekülen in der Atmosphäre, kehrt sich die Relation um. Alle Kriterien, und dies nicht nur bei den klimawirksamen Spurengasen, sind nur im „Strahlungsantrieb“ berücksichtigt, der daher in diesem Buch eine tragende Rolle spielt. Auch in der Klimapolitik findet man gelegentlich seltsame Fehlleistungen und insgesamt wenig Effektivität. Ich hoffe, dass nach der Lektüre dieses Buches jeder in der Lage sein wird, die Fehler und Schwächen der Klimadebatte zu erkennen und sich ein realistisches und fundiertes Urteil zu bilden. Dabei habe ich keine bestimmte Zielgruppe im Visier. Jeder der sich für die Klimawandel-Problematik interessiert, ob mit wissenschaftlichem Hintergrund oder nicht, ist angesprochen.

Ich danke dem Verlag Borntraeger in Stuttgart und dort insbesondere Herrn Dr. Nägele für die freundliche und aufgeschlossene Aufnahme meines Manuskripts und sein großes Engagement bei der Realisierung qualitativ hochwertiger Farbabbildungen. Dem Ulmer-Verlag, ebenfalls Stuttgart, danke ich für die Bereitstellung hochaufgelöster Vorlagen zu den Abbildungen 1,2,6,8,9,10,11,13,22,27 und 30, die aus meinem Lehrbuch „Klimatologie“ stammen¹⁵. Die historischen Fotos des Rhône-Gletschers, die den Rückgang drastisch vor Augen führen (Buchumschlag) hat dankenswerterweise Herr Dr. Nägele von Herrn Prof. Funk (ETH Zürich) beschafft. Das äußerst intensive Lektorat hat Herr Dr. Obermiller zusammen mit Herrn Dr. Nägele durchgeführt und mir dabei zu zahlreichen Verbesserungen der sprachlichen Ausdrucksweise und Verständlichkeit verholfen. Auch dafür danke ich herzlich, wie auch meiner Frau Marianne, die meinen ersten Textentwurf durchgesehen und verbessert hat. Schließlich danke ich Frau Zeusche für die gute Kooperation bei der technischen Vorbereitung der Drucklegung.

Frankfurt a.M./Oberursel, im Oktober 2018
Christian-Dietrich Schönwiese

Inhaltsverzeichnis

1	Klimaforschung	1
2	Atmosphäre und Wetter	6
3	Von der Wetterstatistik zum Klima	14
4	Klimainformationen	19
5	Klimasystem	24
6	Klimaphysik	29
7	Klimamodelle	46
8	Paläoklima (seit Entstehung der Erde)	51
9	Klima im Holozän (letzte ca. 10.000 Jahre)	61
10	Neoklima (letzte 200–250 Jahre)	69
11	Ursachendiskussion (Neoklima) und Zukunftsperspektiven	77
12	Extremereignisse	89
13	Auswirkungen des Klimawandels	97
14	Klimaschutz und Klimapolitik	110
	Zitierte Literatur	117
	Bibliographie	124
	Internet-Links	126
	Stichwortverzeichnis	128

1 Klimaforschung

Das Wort „*Klima*“ taucht erstmalig im antiken Griechenland auf und bedeutet „Neigung“ (κλίμα)⁵¹. Gemeint ist damit der mittlere Winkel der Sonneneinstrahlung auf die Erdoberfläche. Ist dieser Winkel steil, verteilt sich die Sonnenenergie auf eine relativ kleine Fläche und der Erwärmungseffekt ist groß. Ist dieser Winkel dagegen flach, verteilt sich die Sonnenenergie auf eine relativ große Fläche und der Erwärmungseffekt ist klein. Daher definierte bereits PARMENIDES VON ELEA um 500 v.Chr. drei *Klimazonen*: heiß, kalt und dazwischen gemäßigt (heute: tropisch, polar und gemäßigt)¹¹⁵. Nimmt man weitere Differenzierungen und u.a. auch Grundgedanken des „Heilklimas“ (heute heilklimatische Kurorte) durch HIPPOKRATES (460–375 v.Chr.) und weitere Naturphilosophen des antiken Griechenlands hinzu, so kann dies als der Beginn der Klimaforschung angesehen werden; denn auch heute wird in den Strahlungsprozessen der wesentliche Motor für die Klimaprozesse gesehen, die nicht nur das statisch definierte Klima, sondern auch den Klimawandel hervorrufen. Hinsichtlich der Klimazonen muss schon hier der vielseitige und bedeutende Klimatologe WLADIMIR KÖPPEN (1846–1940) erwähnt werden, der das antike Konzept um die Trockenzone (zwischen tropisch und gemäßigt) und das boreale Klima (nordhemisphärisch-kontinental, zwischen gemäßigt und polar, mit großen jahreszeitlichen Temperaturunterschieden) erweitert hat. Trotz etlicher Modifikationen ist dies bis heute das Grundkonzept der globalen Klimaklassifikation^{62a}.

Bei der weiteren *historischen Entwicklung der Klimaforschung* war nach erstaunlich langer Pause einer der wichtigsten nächsten Schritte *die Beobachtung und Dokumentation des Wetters*^{31,102}. Beginnend – soweit wir wissen – durch CLAUDIUS PTOLEMÄUS in Alexandria, 151–127 v.Chr., über WILLIAM MERLE in Driby bei Oxford (England), 1337–1344, und mehrere Astronomen wie JOHANNES KEPLER in Linz, 1617–1626, wurden in den genannten Jahren sog. *Witterungstagebücher* geführt, in denen Tag für Tag verbal das jeweilige Wetter zusammenfassend beschrieben wurde; denn *Messinstrumente* für die einzelnen Wetterelemente waren noch nicht erfunden. Das geschah nun aber sehr bald^{102,115} im 17. Jahrhundert, so (wahrscheinlich) bereits 1611 das Thermometer durch GALILEO GALILEI (1564–1641) und 1643 das Barometer (zur Luftdruckmessung) durch EVANGELISTA TORRICELLI (1608–1647), beides also in Italien. Niederschlagsmessungen mit sehr einfachen Methoden reichen noch sehr viel weiter zurück und die Weiterentwicklung zu den heutigen Niederschlagsmessgeräten erfolgte fließend. Wie wir später erkennen werden (Kap. 3), führt die Langzeitbetrachtung des Wetters zum Klima. So werden aus den Wetterdaten (Messdaten der Wetterelemente Temperatur, Niederschlag usw.) Klimadaten. Um dabei auch den Klimawandel erkennen zu können, müssen die Klimadatenreihen möglichst lang sein. Als Minimum gelten einige Jahrzehnte; besser aber sind Jahrhunderte

(sog. Klimadaten-Säkularreihen). Die am weitesten zurückreichende derartige Klimadatenreihe geht auf das Lebenswerk des englischen Meteorologen GORDON MANLEY (1902–1980) zurück, der ab 1659 die Monatsmittelwerte der bodennahen Lufttemperatur für das sog. zentrale England (beruhend auf den Messungen an mehreren Stationen) zusammengestellt hat⁷⁷. Diese Datenreihe wird bis heute von englischen Klimatologen aktualisiert¹⁸.

Der nächste wichtige Schritt war die Erweiterung der Klimabetrachtung von der Zeit in den Raum. Dazu werden *Messnetze* benötigt. Nach zunächst noch bescheidenen Anfängen in Italien ist hier vor allem das erste internationale Messnetz der Pfälzischen Meteorologischen Gesellschaft (Societas Meteorologica Palatina) mit Sitz in Mannheim zu nennen¹¹⁵. Ab 1780/1781 umfasste es maximal 39 Stationen, die von Nordamerika über Grönland und den Schwerpunkt Deutschland bis zum Ural reichten. Leider bestand diese Gesellschaft nur bis 1795; aber an vielen Stationen wurden die Messungen dank des Engagements u.a. von Pfarrern, Mönchen und Lehrern fortgeführt, bis mit der Gründung der nationalen Wetterdienste, zuerst 1863 in Frankreich, und 1873 ihrem Zusammenschluss in der Internationalen Meteorologischen Organisation (IMO) die Wetter- bzw. Klimadatenerfassung zur weltweiten Aktion wurde¹¹⁵. Die IMO heißt seit 1950 Weltmeteorologische Organisation (WMO), ist eine Fachorganisation der Vereinten Nationen (UN) mit Sitz in Genf und bis heute, mit erweiterter Aufgabenstellung, aktiv. Derzeit gibt es weltweit unter dem Dach der WMO allein an der Erdoberfläche rund 10.000 Messstationen¹¹⁵. Hinzu kommen noch rund 1.000 Stationen, die Ballonaufstiege in die höhere Atmosphäre (im Routinedienst bis ca. 20 km Höhe) durchführen. Somit wird der Teil der Klimaforschung, der sich mit der Erfassung, Bereitstellung und mathematisch-statistischen Analyse von Klima-Beobachtungsdaten befasst, bis heute aufrechterhalten. Hinzu kommen noch die Informationen der historischen Klimatologie und insbesondere das weite Feld der Paläoklimatologie, was zusammen mit der Neoklimatologie in Kap. 4 näher beleuchtet wird. Was die *paläoklimatologische Forschung* betrifft, so sollen hier aber exemplarisch wenigstens einige der vielen Wegbereiter genannt sein: der bereits erwähnte Klimatologe WLADIMIR KÖPPEN, der sich schon sehr früh (1924) intensiv mit dem Klima der Vorzeit beschäftigt hat, der italienisch-amerikanische Geologe CESARE EMILIANI (1922–1995), der die Klimarekonstruktion aufgrund von Sedimentbohrungen in der Tiefsee begründet hat, der dänische Geophysiker und Glaziologe WILLI DANSGAARD (1922–2011), der ähnliche Pionierarbeit durch Bohrungen im polaren Eis (Grönland) geleistet hat, und der Schweizer Physiker HANS OESCHGER (1927–1998), der dies durch die Rekonstruktion der früheren Konzentrationen klimarelevanter Spurengasen ergänzt hat. Insgesamt hat die Erweiterung der direkten Messdatenerfassung (durch die Neoklimatologie) auf die indirekte Klimarekonstruktion durch die Paläoklimatologie dazu geführt, dass wir bis sehr weit zurück in die geologische Vergangenheit über

einen gigantischen Schatz von Informationen über das Klima und seinen Wandel in der Vergangenheit verfügen.

Doch wenn sich die Klimaforschung darauf beschränken würde, wäre sie sehr unvollständig. Mindestens genauso wichtig wie die Informationserfassung anhand von Klimadaten ist das *Verständnis der Prozesse*, die das Klima und den Klimawandel steuern und somit sozusagen die Klimate erzeugen. Dazu wird vor allem die experimentelle und theoretische Physik, aber auch die Chemie benötigt. Sie haben sich ungefähr ab dem 19. Jahrhundert rasant entwickelt, wobei zunächst die atmosphärischen Strahlungs- und Bewegungsgesetze für die Klimatologie bedeutsam sind. Pioniere auf diesem Gebiet der Klimaforschung waren in Deutschland HERMANN FLOHN³⁰ (1912–1997) und FRITZ MÖLLER⁷⁴ (1906–1983). Da die atmosphärischen Klimaprozesse letztlich überaus kompliziert sind, war es notwendig, sie in vereinfachten und doch zielführenden Konzepten zu erfassen, den *Klimamodellen*. Diese Konzepte sind sehr vielfältig und reichen von extrem einfachen Ansätzen, den sog. Energiebilanzmodellen, bis zu überaus aufwändigen dreidimensionalen Zirkulationsmodellen (Simulation der atmosphärischen Bewegungsvorgänge) mit integrierten Strahlungsprozessen (vgl. Kap. 6, 7 und 11): Obwohl auch sie gegenüber der Klimawirklichkeit erheblich vereinfacht sind, benötigen sie selbst an den größten elektronischen Rechenanlagen der Welt (Großcomputern) Rechenzeiten von einigen Monaten. Dabei wird nicht nur die Klimavergangenheit simuliert, sondern – da sich die aufwändigen Klimamodelle von Wettervorhersagemodellen ableiten – auch der Blick in die Zukunft gewagt. Die Entwicklung solcher Klimamodelle ist insbesondere in den USA, England und Deutschland vorangetrieben worden, wobei als Pioniere vor allem SYUKURO MANABE^{74,75,76} (*1931 in Japan, später in den USA tätig), JOHN F.B. MITCHELL (*1948, England) und KLAUS HASSELMANN (*1931, tätig am Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg) zu nennen sind (weiteres und näheres zur Thematik Klimamodelle siehe Kap. 7).

Im Gegensatz zur Wettermodellierung stellte sich bald heraus, dass für das Klima der Blick in die Atmosphäre nicht ausreicht. Zumindest der Ozean muss in Form sog. gekoppelter atmosphärisch-ozeanischer Klimamodelle mit einbezogen werden. Außerdem ist immer wichtiger geworden, neben dem natürlichen auch den *anthropogenen*, also auf menschliche Aktivitäten zurückgehenden *Klimawandel* zu simulieren. Einer der ersten Wissenschaftler, der auf dieses Problem im Zusammenhang mit dem Ausstoß von Kohlendioxid (CO₂) in die Atmosphäre hingewiesen und sogar schon versucht hat, ohne Modelle zu quantitativen Abschätzungen zu kommen, war der schwedische Physikochemiker SVANTE ARRHENIUS (1859–1927)². Damit kommt die *atmosphärische Zusammensetzung* ins Spiel, insbesondere die Konzentration diverser klimawirksamer Spurengase, zu denen u.a. das Kohlendioxid (CO₂) zählt (siehe Kap. 2). Der US-amerikanische Meteorologe CHARLES KEELING (1928–2005) veranlasste 1958 die Einrichtung

einer CO₂-Messstation auf dem Mauna Loa, Hawaii, die bis heute die längste auf direkten Messungen beruhende derartige Messreihe darstellt (sog. Keeling-Kurve, siehe Kap. 11). Entsprechende paläoklimatologische Rekonstruktionen, u.a. auch für Methan (CH₄), reichen noch sehr viel weiter zurück, wozu, wie erwähnt, u.a. HANS OESCHGER beigetragen hat. Und je genauer man werden will, umso mehr Aspekte müssen berücksichtigt werden, so neben den atmosphärischen Gasen auch die Partikel (Aerosole) und hinsichtlich des natürlichen Klimawandels u.a. auch Daten zur vulkanischen und solaren Aktivität. In Deutschland war der bereits genannte HERMANN FLOHN³⁰ einer der ersten, der sich in seiner Forschung intensiv mit dem anthropogenen, aber auch natürlichen Klimawandel beschäftigt hat. Auch er wusste, dass es wenig Sinn macht, den anthropogenen Klimawandel separat zu betrachten, sondern dass es sehr wichtig ist, von vornherein zu einer möglichst *ganzheitlichen Analyse* zu kommen. Weiterhin ist wichtig, auch die *Auswirkungen* des Klimawandels zu erforschen, und zwar nicht nur naturwissenschaftlich, wie z.B. ökologisch, sondern auch sozioökonomisch. Seit 1992 existiert zu diesem Zweck in Deutschland das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, bis 2018 unter der Leitung von HANS JOACHIM SCHELLNHUBER (*1950).

Somit reicht die Klimaforschung bis ins antike Griechenland zurück, hat aber dank der hilfreichen Entwicklung der Naturwissenschaften und elektronischen Datenverarbeitung insbesondere seit der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts enorm an Umfang, Breite, Tiefe und Bedeutung zugenommen. Entsprechend interdisziplinär sind die Klima-Forschungsaktivitäten, und dies weltweit. Dabei können als besonders *relevante Wissenschaften* die Meteorologie, hinsichtlich der physikalischen Klimaprozesse, und die Geographie, hinsichtlich der klimatologischen Phänomene und Auswirkungen an der Erdoberfläche, angesehen werden. Hinzu kommen, ohne Anspruch auf Vollständigkeit, die Grundlagenwissenschaften Physik, Chemie, Mathematik und Informatik, die Spezialwissenschaften Ozeanographie, Glaziologie, Biologie und Ökologie sowie letztlich auch die Ökonomie (hinsichtlich der ökonomischen Folgen des Klimawandels) und die Soziologie (soziale Folgen des Klimawandels, beides als sozioökonomische Aspekte zusammengefasst) und immer dringlicher die Klimapolitik (siehe Kap. 14).

Institutionen, die Klimaforschung betreiben, sind in Deutschland u.a. Universitäten und Großforschungseinrichtungen wie das Max-Planck-Institut für Meteorologie (Hamburg), das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, das Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (Bremerhaven), das Fraunhofer-Institut für atmosphärische Umweltforschung (Garmisch-Partenkirchen) sowie das Umweltbundesamt (Dessau). Da die finanzielle Grundausstattung, insbesondere an den Universitäten, oft unzureichend ist, wird die Klimaforschung u.a. durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert. Zum Zweck der *internationalen Koordination* haben 1974 die WMO (Weltmeteorologische Orga-

nisation) und UNEP (UN Environmental Programme) das Weltklimaprogramm (World Climate Programme, WCP) initiiert, das aus mehreren Unterprogrammen besteht, darunter das wichtige Weltklimaforschungsprogramm (World Climate Research Programme, WCRP). Direktor war zeitweise (1994–1999) der deutsche Klimatologe HARTMUT GRASSL (*1940). Ein Glücksfall für die Bereitstellung der wissenschaftlichen Forschungsergebnisse und deren Diskussion ist das von der WMO und UNEP (vgl. jeweils oben) 1988 ins Leben gerufene „*Intergovernmental Panel on Climate Change*“ (IPCC, dt. Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen, in den Medien meist „Weltklimarat“ genannt). Es hat zu den Ergebnissen der Klimaforschung, insbesondere auch zum anthropogenen Klimawandel, 1992, 1996, 2001, 2007 und zuletzt 2013/2014 mit immensem Aufwand verfasste, ausführliche Berichte (Assessments Reports, AR) veröffentlicht. Diese behandeln, je nach Arbeitsgruppe, die physikalischen Grundlagen (allein dieser Teilbericht umfasst in der letzten ausführlichen Druckversion 1.535 Seiten), die Auswirkungen und den Handlungsbedarf. Sie werden durch sog. Syntheseberichte und zusätzliche spezielle Berichte ergänzt. Das IPCC berücksichtigt ausschließlich begutachtete Fachliteratur (peer reviewed papers) und ist, im Gegensatz zu manchen anderen Quellen, besonders seriös und zuverlässig. Insgesamt spiegelt sich darin der sehr bemerkenswerte Konsens der wissenschaftlichen Klimaforschung weltweit wider, bestätigt von diversen wissenschaftlichen Institutionen. Diesem Konsens ist auch das vorliegende Buch verpflichtet. Übrigens ist das IPCC 2007 zusammen mit dem ehemaligen USA-Vizepräsidenten Al Gore mit dem Friedensnobelpreis ausgezeichnet worden.

2 Atmosphäre und Wetter

Der Ort des Klimageschehens ist primär die *Atmosphäre* der Erde. Sie hat eine untere Grenzfläche, mit der sie in Wechselwirkung steht, nämlich die Land- bzw. Ozeanoberfläche, und geht nach oben hin kontinuierlich und somit ohne obere Grenzfläche in den interplanetarischen Raum über. Die somit fiktive Obergrenze der Atmosphäre wird meist in der Größenordnung von 1.000 km Höhe angenommen, wo die Bedingungen eines technischen Hochvakuums herrschen.

Orientiert man sich an der mittleren Lufttemperatur, so weist die Atmosphäre eine deutliche *vertikale Gliederung* auf^{f1,41,63,115}, vgl. Abb. 1. In der untersten Schicht, der Troposphäre, nimmt die Temperatur mit der Höhe ab, und zwar im Mittel von 15 °C (Meereshöhe) auf –55 °C in 11 km Höhe. Allerdings sind dies Normwerte, von denen im Einzelfall ganz erhebliche Abweichungen auftreten. So reicht in den Tropen die Troposphäre bis in 17 km Höhe (Tropopause) und kühlt bis dort auf ca. –80 °C ab. Dagegen ist in den Polargebieten die Troposphäre je nach Jahreszeit nur ca. 8–10 km hoch, mit Tropopausen-Temperaturwerten zwischen ca. –40 und –50 °C. Zudem gibt es in den unteren 1–2 km der Troposphäre häufig sog. Inversionen, d.h. die Temperatur nimmt mit der Höhe nicht ab, sondern zu, und erst darüber zeigt sich die übliche vertikale Temperaturabnahme. Der häufigste, aber nicht alleinige Grund für die Bildung einer solchen Inversion in Bodennähe ist die terrestrische (von der Erdoberfläche ausgehende) Ausstrahlung in der Nacht, die der Erdoberfläche Energie entzieht und sie dadurch abkühlt, ohne dass die (nachts fehlende) Sonneneinstrahlung dies kompensieren kann. Die terrestrische Ausstrahlung wird durch fehlende oder geringe Bewölkung begünstigt und ist im Winter besonders wirksam, wenn die Sonne in mittleren und relativ hohen Breiten nur relativ kurze Zeit über dem Horizont steht. Wegen dieser Strahlungsprozesse als Ursache wird von einer Strahlungs-inversion gesprochen.

Darüber, bis ungefähr 50 km Höhe, finden wir die Stratosphäre, mit zunächst keiner vertikalen Temperaturänderung (worauf die Bezeichnung „stratos“, d.h. gleichförmig, aber auch Schicht, hinweist, im Gegensatz zu „tropos“, d.h. Wendung; in der Troposphäre wendet sich die Temperatur sozusagen mit der Höhe geringeren Werten zu). In der oberen Stratosphäre nimmt die Temperatur jedoch mit der Höhe zu. Wiederum sind Strahlungsprozesse die Ursache: Wir finden dort relativ viel Ozon (O₃), das die Eigenschaft besitzt, kurzwellige und somit ultraviolette Strahlung (UVC- und UVB-Bereich) zu absorbieren, wie sie zusammen mit langwelligerer Strahlung (Licht und Wärme) von der Sonne ausgeht (näheres in Kap. 6). Die gesundheitsschädliche, relativ kurzwellige solare Strahlung wird somit fast vollständig von der Troposphäre ferngehalten. Daher spricht man vom Ozonschutzschild der Stratosphäre. Absorption von Strahlung, gleich welcher Art, bedeutet generell Erwärmung der absorbierenden Materie, in diesem Fall

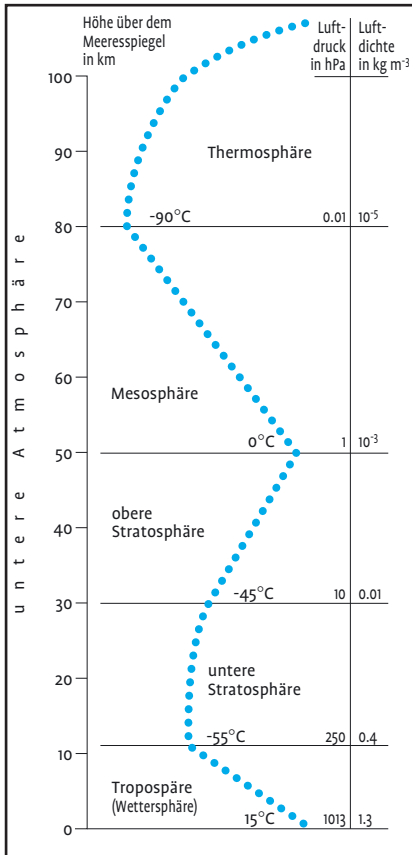


Abb. 1. Vertikalgliederung der unteren Atmosphäre (bis 100 km Höhe) mit Temperaturverlauf, Luftdruck und Luftdichte; nach SCHÖN-WIESE¹¹⁵.

der O₃-Gasmoleküle. Und immer wird die Erwärmung durch Wärmeleitung (mikrophysikalisch genauer gesagt durch Stoßreaktionen) an die benachbarten Moleküle weitergegeben, so dass sich die ganze betreffende Schicht erwärmt. Auch dies beruht auf einem universalen Naturgesetz (siehe Kap. 6). In der Mesosphäre, zwischen ca. 50 und 80 km Höhe, nimmt die Temperatur wie in der Troposphäre mit der Höhe wieder ab.

Diese vertikale Temperaturabnahme in der Troposphäre ist leicht erklärbar: Die Sonneneinstrahlung erwärmt die weitaus „dichtere“ (viele Moleküle pro Raumeinheit) Erdoberfläche wesentlich stärker als die viel weniger dichte Atmosphäre, wo die Sonneneinstrahlung auf wesentlich weniger Moleküle trifft, die diese Strahlung absorbieren und sich dabei erwärmen können. Die Atmosphäre wird also von unten her geheizt, wie durch eine Herdplatte, und gibt die Wärme nach oben hin durch Wärmeleitung (und auch kompliziertere Wärmetransportmechanismen, siehe Kap. 6) ab. In der Mesosphäre ist die Situation weniger offensichtlich, was uns aber nicht weiter kümmern muss, weil für das Klima vor allem die Troposphäre und die Stratosphäre von Bedeu-

tung sind. Noch weiter oben, in der Thermosphäre, ist wegen des sehr geringen Luftdrucks und damit der sehr geringen Luftdichte die Temperaturdefinition problematisch (siehe unten). Nur am Rande sei erwähnt, dass die Thermosphäre bis ungefähr 1.000 km Höhe reicht und sich daran nach oben hin die Exosphäre anschließt, die schon zum interplanetarischen Raum gehört. In Abb. 1 sind jedoch nur die unteren 100 km der Erdatmosphäre erfasst.

Die *Temperatur* ist das fundamentale *Wetter-* und insbesondere, langfristig betrachtet, *Klimaelement*. Sie wird zumeist in °C (Grad Celsius), in angelsächsischen Ländern aber auch in °F (Grad Fahrenheit) angegeben, mit der Umrechnung $^{\circ}\text{C} = (^{\circ}\text{F} - 32) \cdot 5/9$. Physikalisch ist noch die Maßeinheit K (Kelvin, ohne das Grad-Symbol °) wichtig (mit der Umrechnung $^{\circ}\text{C} = \text{K} - 273$). Physikalisch ist die Temperatur als die mittlere Bewegungsenergie der Atome und Moleküle definiert und somit an Materie gebunden. Diese Definition ist nur dann sinnvoll, wenn die sich erwärmenden oder abkühlenden Atome und Moleküle genügend weitere Atome und Moleküle in ihrer Umgebung vorfinden, an die sie die Temperatur per Stoßreaktion weitergeben können. Ist das nicht der Fall, die Luftdichte also sehr gering wie in der Thermosphäre und darüber, so muss sich ein Atom bzw. Molekül unter Umständen sehr weit bewegen, bis es zu Stoßreaktionen kommt. Dabei kann es eventuell immer schneller werden, was theoretisch eine immer höhere Temperatur bedeuten würde. Ein Thermometer aber würde nur wenige Stoßreaktionen mitbekommen und daher eine sehr tiefe Temperatur anzeigen. Daher ist es sinnlos, für solche Höhen Temperaturen angeben zu wollen. Ganz oder fast ohne Materie, wie im Weltraum zwischen den Himmelskörpern, wird i.a. die sog. Weltraumkälte angenommen. Das sind -273°C bzw. 0 K, die tiefstmögliche Temperatur. Sie bedeutet gar keine Bewegung der Atome und Moleküle und wird auch als absoluter Nullpunkt der Temperatur bezeichnet.

Statt der Luftdichte wird an den Wetterstationen der damit eng verknüpfte *Luftdruck* gemessen und ist daher ein weiteres *Wetter-* bzw. *Klimaelement*. Er wird in hPa (Hektopascal = 100 Pa (Pascal)) angegeben. Die Druckeinheit Pa ist definiert als die Kräfteinheit N (Newton) pro m^2 (Quadratmeter). In der Erdatmosphäre nimmt der Luftdruck ungefähr alle 5,5 km um die Hälfte ab und beträgt statt in Meereshöhe im Mittel rund 1.000 hPa (Normwert genauer 1013,25 hPa), in 10 km Höhe nur noch rund 250 hPa, in 50 km Höhe rund 1 hPa und in 80 km Höhe ca. 0,01 hPa (=1 Pa). Entsprechend nimmt mit der Höhe auch die Luftdichte ab, vgl. Abb. 1.

Ein weiteres wichtiges *Wetter-* bzw. *Klimaelement*, das beim Klima hinsichtlich seiner Bedeutung gleich nach der Temperatur kommt, ist der *Niederschlag*. Fällt er in flüssiger Form, also als Wasser, wird er direkt in mm (Millimeter) angegeben. Dies entspricht l/m^2 (Liter pro Quadratmeter, weil ein Liter Wasser auf einer Fläche von einem Quadratmeter verteilt 1 mm hoch stehen würde). Die weiteren Wetterelemente, die routinemäßig an Wetterbeobachtungsstationen gemessen werden, sind hinsichtlich der langfristigen Klimaentwicklung von geringer Bedeutung, auch hinsichtlich der Datenverfügbarkeit. Dies gilt aber nicht für die Klimaphysik (Kap. 6) und insbesondere nicht für die Luftfeuchte, den Wasserdampfgehalt (H_2O) der Luft. Er wird in verschiedenen Maßeinheiten angegeben, häufig auch als relative Feuchte, d.h. in Prozentwerten der bei einer bestimmten Temperatur maximal möglichen Feuchte (siehe Kap. 6). Weiterhin