

Christian Schönwiese

Klimawandel kompakt

Ein globales Problem wissenschaftlich erklärt

Welche Prozesse steuern unser Klima? Was ist Klimawandel, seit wann gibt es ihn, was sind seine Ursachen und welche Rolle spielt dabei der Mensch? Was sind die Risiken und Folgen des Klimawandels? Und nicht zuletzt: Was bringt uns die Zukunft und was ist zu tun?

Mit Antworten auf diese Fragen wendet sich dieses Buch an alle Leser, die an der Klimawandel-Problematik interessiert sind und sich fachlich korrekt, aber kompakt informieren wollen. Da wir alle von der Gunst des Klimas abhängig sind, kann uns nicht gleichgültig sein, was mit dem Klima geschieht. Soweit wir das Klima selbst beeinflussen, kommt uns eine besondere Verantwortung zu.

Der Autor ist international renommierter Klimatologe und Gutachter des IPCC und beschäftigt sich seit Jahrzehnten in Forschung und Lehre intensiv mit dem Klimawandel. Er hat über 200 Fachpublikationen hierzu verfasst. In diesem Buch beschreibt er aktuell und streng wissenschaftlich, aber trotzdem leicht verständlich, den Klimawandel mit seinen vielfältigen Ursachen. Dabei spannt er den Bogen von der Entstehung der Erde über alle zeitlichen Größenordnungen bis hin zum heutigen Industriezeitalter, das wegen der Diskussion menschlicher Einflüsse in besonderer Weise Gegenstand der öffentlichen Diskussion ist. Mit Hilfe von Modellrechnungen erklärt er den Klimawandel in Vergangenheit und Gegenwart. In sogenannten Projektionen wird ein Blick in die Zukunft und auf die meteorologischen, ökologischen und sozioökonomischen Auswirkungen des Klimawandels und auf die Klimapolitik gewagt.

Der Text wird durch 11 Tabellen und 32 mehrfarbige Abbildungen ergänzt und veranschaulicht. Hinzu kommen eine umfangreiche Literaturliste, eine Auswahl von Internet-Links und ein ausführliches Stichwortverzeichnis.

www.borntraeger-cramer.de

ISBN 978-3-443-01104-8



9 783443 011048



Christian Schönwiese

Klimawandel kompakt

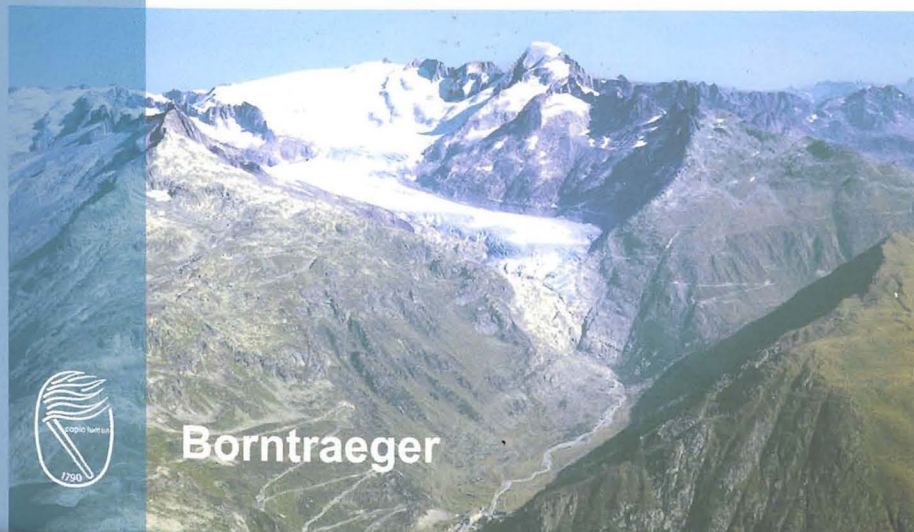
HV
3527



Christian Schönwiese

Klimawandel kompakt

Ein globales Problem
wissenschaftlich erklärt



Borntraeger



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.

ISBN 978-3-443-01104-8

Information on this title: www.borntraeger-cramer.de/9783443011048

© 2019 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

Printed in Germany by Tutte Print GmbH, Druckerei & Verlagsservice, Salzweg

Vorwort

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 geben 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, 1997¹¹³). 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 (CH₄) sei klimawirksamer als Kohlendioxid (CO₂). Dabei wird verschwiegen, dass dieses „Treibhauspotential“ nur pro Molekül gilt. Berücksichtigt man u.a. die viel höhere Konzentration und somit viel größere Zahl von CO₂-Molekülen in der Atmosphäre, kehrt sich die Relation um. Alle Kriterien,

3 Von der Wetterstatistik zum Klima

Kurz und knapp ausgedrückt ist das Klima die statistische Beschreibung der relevanten Klimaelemente (vgl. Kap. 2) für einen relativ langen Zeitraum, noch kürzer ausgedrückt, die *Langzeitstatistik des Wetters*. Grundlegend für die Charakterisierung des Klimas sind somit die Erfassung, Dokumentation und vor allem statistische Analyse der Beobachtungsdaten, vorzugsweise hinsichtlich der Wetter- bzw. Klimaelemente Temperatur und Niederschlag. Um dies zu verstehen, ist es unumgänglich, sich ein wenig mit der *mathematischen Statistik* zu beschäftigen. (Leider werden oft auch Umfragen fälschlicherweise als Statistiken bezeichnet, obwohl sie mit der mathematischen Statistik nichts zu tun haben.)

Die einfachste, wohl jedem geläufige statistische Maßzahl ist der (arithmetische) *Mittelwert*. Man kann also z.B. aus den täglichen Messdaten der bodennahen Lufttemperatur, tägliche, monatliche und jährliche Mittelwerte berechnen. Die WMO (Weltmeteorologische Organisation) hat weitergehend empfohlen, bis zu 30-jährigen Mittelwerten weiterzugehen und diese als „*Klimanormalwerte*“ zu bezeichnen. Die betreffenden Zeitintervalle waren bisher 1901–1930, 1931–1960 und aktuell 1961–1990. Der Vergleich solcher Zahlenwerte kann dann schon Hinweise auf den Klimawandel geben. Sie betragen z.B. für Deutschland in den heutigen Grenzen bezüglich der Jahresmitteltemperatur 7,9 °C, 8,2 °C und 8,3 °C (für 1986–2015 bereits 9,1 °C), zeigen also eine systematische Erwärmung an. Das Klima nun einfach als 30-jährige Mittelwerte von Temperatur usw. zu bezeichnen, greift allerdings viel zu kurz. Um Klimawandel zuverlässig zu erkennen, benötigen wir viel längere Zeitspannen, und zwar mindestens ca. 100 Jahre, besser aber noch sehr viel längere Zeiträume (siehe Kap. 8–10).

Zudem zeigt dieses Beispiel, dass der Klimabegriff nicht bei einzelnen Messstationen stehen bleibt (so sinnvoll und hilfreich das sein kann und in Klimatabellen auch geschieht, z.B. für beliebige Urlaubsorte, aber auch unseren Wohnsitz). Es interessieren auch die mittleren Gegebenheiten in bestimmten Regionen (z.B. Deutschland, Europa) bis hin zur gesamten Erde. Dementsprechend wird vom *Stations-* bzw. *Regional-* bzw. *Globalklima* gesprochen. Um dies zu realisieren, sind außer der zeitlichen auch räumliche Mittelungen erforderlich. Obwohl es im Computerzeitalter Rechenprogramme gibt, die das problemlos liefern (und das keinesfalls nur in der Klimatologie), muss das Grundprinzip doch umrissen werden. Es beginnt mit räumlichen Interpolationen auf ein regelmäßiges Gittersystem, siehe Abb. 2. Ist das geschehen, ergibt sich der *räumliche Mittelwert* ganz einfach aus dem Mittel der Werte an den Gitterpunkten. Die Interpolation selbst besteht darin, aus bekannten Zahlenwerten auf unbekannte zu schließen. Beträgt z.B. an einer Messstation der Temperaturwert 5 °C und an der nächsten 7 °C und liegt dazwischen ein Gitterpunkt, so kann man dort 6 °C annehmen. Doch, wie immer, ist trotz einfachem Grundprinzip die Realität wesentlich komplizierter.

Um dieses Problem zu lösen, sind etliche Algorithmen (Rechenvorschriften) entwickelt worden, bei denen stets mehrere Stationen in die Berechnungen eingehen und nicht nur einfache lineare Beziehungen benützt werden¹¹⁶. Die Zuverlässigkeit der Interpolationsverfahren kann man dadurch prüfen, dass bekannte Stationswerte weggelassen werden, dorthin interpoliert wird und die Abweichungen von den bekannten Werten betrachtet werden. Das Verfahren mit den geringsten Abweichungen ist das Beste. Übrigens wird uns das Prinzip der Gitterpunktsysteme bei den Klimamodellen (Kap. 7) wieder begegnen. Dort wird dann auch der Begriff der *Skaligkeit* (siehe erneut Abb. 2) eine Rolle spielen: die in einem bestimmten Fall erfasste Region. Subregionen, die das jeweilige Gitternetz nicht auflöst, heißen *subskalig*, übergeordnete größere, z.B. die globale, *supraskalig*. International kombiniert der Begriff „Scale“ übrigens die räumliche mit der zeitlichen Größenordnung.

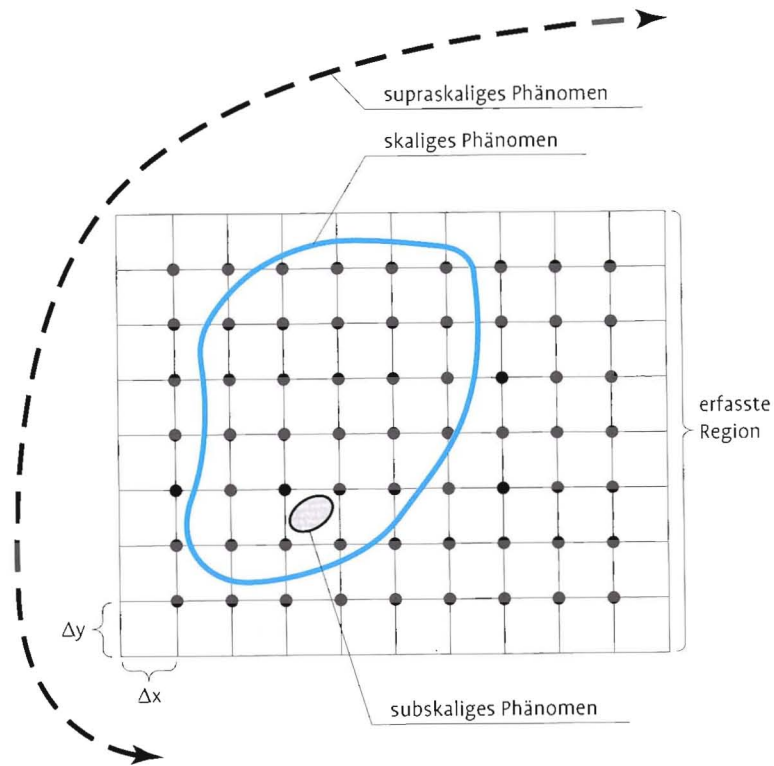


Abb. 2. Gitternetz zur Berechnung räumlicher Mittelwerte und der Startbedingungen von Klimamodellen, mit Erklärung der Skaligkeit, Subskaligkeit und Supraskaligkeit; nach SCHÖNWIESE¹¹⁵.

gesagt ist es so, dass sozusagen der Motor dafür im Bereich des Nordatlantiks liegt, wo es episodisch zu Vorstößen von Warmwasser gekommen ist, vergleichbar der heutigen Wirkung des Nordatlantikstroms (vgl. Abb. 7 in Kap. 6). Teilweise führte dies zum Abschmelzen von polarem Landeis und der darauf beruhende Süßwassereintrag hat die Dichte des Ozeanwassers so stark reduziert, dass dort die thermohaline Zirkulation (THC; vgl. Kap. 6) stark geschwächt wurde und der Nordatlantikstrom wieder in den Normalmodus einer Kaltzeit zurückgefallen ist. In diesem Normalmodus kommt er wesentlich weniger weit nach Norden voran, was für das Kaltzeit-Klima typisch ist.

Im Prinzip ähnlich aber wesentlich effektiver war der Kälterückschlag am Ende der Würm-Kaltzeit (vgl. wiederum Abb. 15). Im Wesentlichen von den Orbitalparametern gesteuert war der Übergang von der Würm-Kaltzeit zum Holozän, unserer heutigen Neo-Warmzeit, schon fast geschafft, als es zu einer so drastischen Abkühlung kam, dass das Klima fast völlig auf den Kaltzeit-Zustand zurückfiel. Diese Episode wird „Jüngere Dryaszeit“ genannt^{12,54,89} (in der älteren deutschen Literatur auch „Jüngere Tundrenzeit“; Dryas ist eine sog. Zeigerpflanze, die zur Identifikation von in diesem Fall relativ kalten Klimazuständen dient) und ist auf die Zeit 12.850–11.650 vor heute datiert⁵⁴. Als Ursache^{12,36,54} vermutet man ein großräumiges Abschmelzen von Polareis als Folge von Erwärmung, wobei sich insbesondere im Bereich des damaligen Laurentidischen Eisschildes (Nordamerika) wahrscheinlich riesige Schmelzwassersseen gebildet haben. Schließlich wurden diese wohl instabil und gewaltige Süßwassermengen ergossen sich in den Nordatlantik. Dadurch wurde im Bereich der Absinkgebiete des Nordatlantikstroms (vgl. wiederum Abb. 8 in Kap. 6) das Absinken des Ozeanwassers praktisch zum Erliegen gebracht und der Warmwassertransport des Nordatlantikstroms nach Europa völlig blockiert. Die entsprechende Abkühlung war so stark, dass sie weltweite Auswirkungen hatte. Erst einige Jahrhunderte später (vgl. oben) ist der Nordatlantikstrom sozusagen wieder angesprungen und der Wärme-Übergang ins Holozän konnte nun endlich ungestört erfolgen.

9 Klima im Holozän (letzte ca. 10.000 Jahre)

Das Holozän, unsere derzeitige Neo-Warmzeit (auch Nacheiszeit bzw. Postglazial genannt), begann ziemlich genau vor 11.600 Jahren, nach der Jüngeren Dryaszeit (beim Übergang Würm-Kaltzeit → Holozän, vgl. Kap. 8)^{54,115}. Seine erste Hälfte ist, was den Klimawandel angeht, nur paläoklimatologisch (und somit indirekt) erfasst. In der zweiten Hälfte kommen allmählich einige historische Informationen hinzu, allerdings meist verbal und indirekt (vgl. Kap. 4), auch wenn sie ungefähr für die letzten beiden Jahrtausende recht zahlreich und aussagekräftig sind. Schließlich, seit ungefähr 1850, haben wir dann auf direkten Messdaten beruhende globale Klimainformationen. Dieses sog. Neoklima wird uns im Kap. 10 eingehend beschäftigen. Insgesamt ergibt sich somit eine Dreiteilung des Holozän: frühes Holozän, letzte ca. 2.000 Jahre und Neoklima.

Einen Überblick über die Temperaturentwicklung, allerdings nur im nordhemisphärischen Mittel, erlaubt Abb. 16. Bei der immer besser werdenden regionalen Auflösung der Temperaturrekonstruktionen darf man nämlich nicht mehr davon ausgehen, dass der Klimawandel global einigermaßen zeitgleich verlaufen ist. Die noch wesentlich genauere Informationsgrundlage des Neoklimas wird uns in Kap. 10 dementsprechend räumlich sehr differenzierende Betrachtungen erlauben. Hier, beim Überblick des Holozäns, mögen relativ grobe Aussagen ausreichen. Dabei erkennen wir, dass es unter Fluktuationen zunächst eine Erwärmung

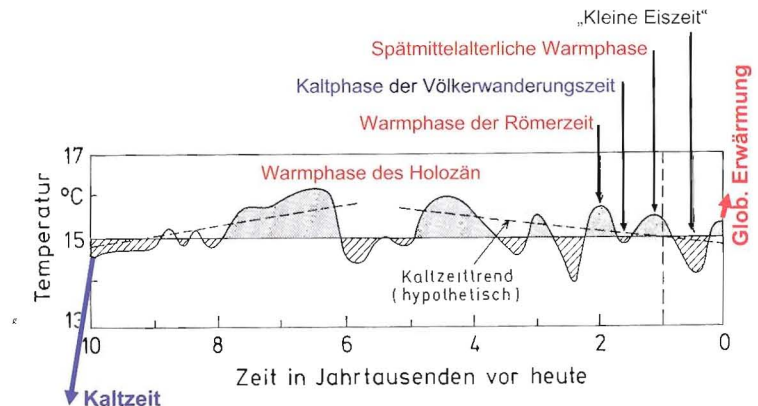


Abb. 16. Relative Änderungen der nordhemisphärisch gemittelten bodennahen Lufttemperatur in den letzten 10 Jahrtausenden; nach verschiedenen Datenquellen, insbesondere CLARK¹⁶, zusammengestellt nach SCHÖNWIESE¹¹⁵, verändert.

erwähnten Klimamodellrechnungen⁵⁴ vor allem um 1250–1300 (also sehr früh), 1450–1500, weniger intensiv ca. 1600–1700 und zuletzt sehr ausgeprägt noch einmal 1800–1850 besonders kalte Epochen innerhalb der „Kleinen Eiszeit“. Zu Vergleichszwecken sind in Tab. 6 für verschiedene Klimazustände die Temperaturanomalien (Abweichungen gegenüber dem Referenzniveau von 1961–1990) für die Nordhemisphäre und Deutschland angegeben. Danach war es damals, in der „Kleinen Eiszeit“, im Mittel ca. 0,5 bzw. 1 °C kälter als heute, gegenüber 4–5 °C (Nordhemisphäre) bzw. sogar 12–14 °C (Deutschland) in der sozusagen letzten „echten“ Kaltzeit (Würm-Kaltzeit).

Was die Bewertung der Folgen des Klimawandels betrifft, so hat sowohl eine drastische Erwärmung als auch eine drastische Abkühlung negative Auswirkungen (neben mehr oder weniger, meist weniger positiven). Aus dieser Sicht wäre Klimastabilität eigentlich am günstigsten; aber die hat es klimageschichtlich höchst selten gegeben. Der Übergang zur Kaltphase der „Kleinen Eiszeit“ hatte vor allem in Nordwest- und Mitteleuropa (über andere Regionen ist weniger bzw. nichts bekannt) negative landwirtschaftliche Auswirkungen. Es kam verbreitet zu Missernten und in Verbindung mit der Pest zu vielen Todesfällen. Allein zwischen 1300 und 1327 n.C. hat die Bevölkerung Englands um ein Drittel abgenommen⁶⁵, und zwar überwiegend klimabedingt. Aus Deutschland werden schlechtere Weinqualitäten^{40,102} berichtet und aus Europa insgesamt eine Verlagerung der Weinanbaugebiete um ungefähr 500 km nach Süden. Auch soziale Unruhen werden in Zusammenhang mit der „Kleinen Eiszeit“ gesehen, wobei – wie immer – nicht nur das Klima sondern auch sozial-politische Missstände beteiligt waren, so auch an den Bauernkriegen in Deutschland (1524–1526). Ob auch die Französische Revolution (1789–1792) hier einzuordnen ist, erscheint etwas weit hergeholt, obwohl auch in diesem Fall die Bevölkerung unter Hunger litt und das Klima dabei sicherlich nicht ganz unbeteiligt war. Weniger dramatische, aber durchaus weitere Indizien für die „Kleine Eiszeit“ sind Entwicklungen in der Kunst, insbesondere die Häufung von Wintergemälden (vor allem in Holland) und Winterliedern in der Volks- und Kunstmusik. Klimahistorisch steht dies im Kontext mit häufigen Küstenvereisungen, übrigens nicht nur in Holland und Deutschland, sondern beispielsweise auch in Island⁶⁴. Schließlich sind in diesem Zusammenhang die Entdeckungsreisen einiger berühmter Seefahrer zu nennen, die bei der Suche nach einem Seeweg nach Indien u.a. zur Wiederentdeckung Amerikas (1492) geführt haben und die später darauf folgenden Auswandererwellen dorthin, in der Hoffnung, dort bessere landwirtschaftliche Möglichkeiten vorzufinden als in Europa.

Die „Kleine Eiszeit“ ist – regional etwas unterschiedlich aber im Wesentlichen global – ab ungefähr 1850, spätestens um ca. 1900 n.C. zu Ende gegangen. Dies ist bereits aus Abb. 17 ersichtlich. Damit beginnt die Zeit, aus der direkte Messungen vorliegen, also die Zeit, die als Neoklima bezeichnet wird. Darum geht es im nun folgenden Kapitel (Kap. 10).

10 Neoklima (letzte ca. 200–250 Jahre)

Regional gibt es direkte Messungen der bodennahen Lufttemperatur im zentralen England bereits seit 1654⁷⁷ (vgl. Kap. 4), in Deutschland seit 1761⁹⁹, in befriedigender globaler Abdeckung aber erst seit 1850^{18,57}. Diese Zeit wird als Neoklima bezeichnet, alternativ auch als modernes Klima oder, insbesondere im angelsächsischen Sprachbereich, als instrumentelle Epoche (Instrumental Period), obwohl auch die Paläoklimatologen mit Messinstrumenten arbeiten. Sie messen die Temperatur und andere Klimatelemente allerdings nicht direkt, sondern müssen indirekt darauf schließen (vgl. Kap. 4 und 8). Wie auch immer, mit dem Neoklima beginnt eine Zeit, die uns erlaubt, den Klimawandel besonders umfassend, exakt, genau und verlässlich zu beschreiben. Zufällig, man kann auch sagen glücklicherweise, ist gerade dies die Zeit, in der die globale, genauer gesagt im globalen Mittel feststellbare Erwärmung einsetzt („Global Warming“). Von den anderen Klimatelementen soll uns nur noch der Niederschlag interessieren, der seit ungefähr 1900 in hinreichend guter globaler Abdeckung erfasst ist.

Die „globale Erwärmung“ war bereits in der Abb. 17 (Kap. 9) gut erkennbar, insbesondere auch im Gegensatz zu den Schwankungen davor, die offenbar wesentlich weniger ausgeprägt waren und vor allem weniger rasch abgelaufen sind. Vielleicht gilt das sogar für das ganze Holozän mit Ausnahme des Übergangs von der Jüngeren Dryaszeit ins Holozän (vgl. wiederum Kap. 9). Die in den Medien beliebte Ausdrucksweise „Klimaerwärmung“ ist sprachlicher Unsinn, da man ei-

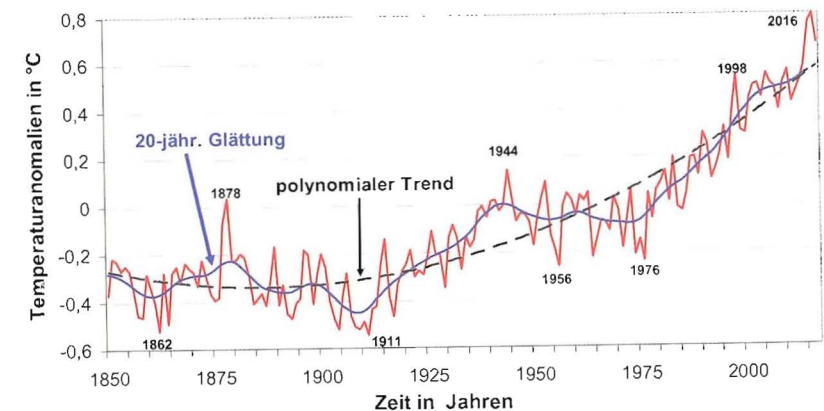


Abb. 19. Jahresanomalien der global gemittelten (Landgebiete und Ozeane) bodennahen Lufttemperatur 1850–2017 mit 20-jähriger Glättung (blau) und polynomialem Trend (schwarz gestrichelt); Datenquelle CRU¹⁸, bearbeitet.

nen abstrakten Begriff wie „Klima“ nicht erwärmen kann, sondern nur Materie wie die atmosphärische Luft. (Noch größerer Unsinn ist die „Temperaturerwärmung“.) Wie sieht nun aber diese „globale Erwärmung“ im Detail aus? Darüber gibt Abb. 19 Auskunft. Datenquelle ist die „Climatic Research Unit“ (CRU)¹⁸ der Universität von East Anglia in Norwich, England. Die dortigen Klimatologen stellen seit langem u.a. globale Gitterpunktdatensätze der bodennahen Lufttemperatur zur Verfügung und aktualisieren sie ständig, einschließlich Korrekturen früherer Daten. Im globalen Mittel erkennen wir (Abb. 19) nicht nur den auch in der Öffentlichkeit häufig zitierten Erwärmungstrend von rund 1 °C, sondern auch überlagerte Jahr-zu-Jahr-Variationen (annuäre Variabilität) und mit statistischen Mitteln in unterschiedlicher Weise in Erscheinung tretende mehrjährige Schwankungen (dekadische Variabilität). Diese Variationsstruktur ist typisch für klimatologische Zeitreihen.

Genau genommen hat nach diesem Datensatz die „globale Erwärmung“ erst 1912 begonnen, nach dem absoluten Minimum von 1911. Doch war ein fast genauso tiefes relatives Minimum bereits 1862 eingetreten. Der Erwärmungstrend selbst ist offenbar nicht-linear, somit in Abb. 19 nicht als Gerade dargestellt, sondern als Kurve. Nur am Rande sei erwähnt, dass diese Kurve auf der mathematischen Gleichung eines Polynoms beruht und daher als polynomialer Trend bezeichnet wird¹⁶. Erst dadurch wird erkennbar, dass wir es ab 1850 zunächst mit einer leichten Abkühlung zu tun hatten, ab ca. 1900 dann mit einer Erwärmung, die sich im Weiteren ständig intensiviert hat. In Orientierung an die Jahreswerte ist das bisherige absolute Maximum im Jahr 2016 eingetreten, frühere relative Maxima in den Jahren 1944 und 1998. Die angegebenen Datenwerte sind übrigens sog. Anomalien, d.h. Abweichungen vom Mittelwert eines definierten Zeitintervalls, das nach internationalen Empfehlungen noch 1961–1990 ist (vgl. sog. Klimanormalwerte, Kap. 3). Interessanterweise sind diese Anomalien genauer als der Mittelwert selbst, weil sich einige mögliche systematische Fehler – z.B. systematisch zu hohe Messwerte in den Städten wegen der sog. städtischen Wärmeinsel, also der Tatsache, dass Städte wärmer als ihre Umgebung sind – in den Anomalien egalisieren. Man macht also diesbezüglich immer den gleichen Fehler, der nur im Mittelwert vorhanden ist, nicht aber in den Anomalien, den Abweichungen davon.

Lange Zeit ist in den Lehrbüchern der Klimatologie ein Wert von 15 °C als globaler Mittelwert der bodennahen Lufttemperatur (bodennah heißt, in 2 m Höhe über der Erdoberfläche) angegeben worden, ohne Berücksichtigung des heute klar erkennbaren Erwärmungstrends. In den letzten Jahrzehnten haben die dank der Satellitentechnik möglichen flächenbezogenen Abschätzungen genauere Werte geliefert. Daher haben die Klimatologen an der Climatic Reseach Unit (CRU, vgl. oben)⁵⁷ für 1961–1990 einen Mittelwert von 14,0 °C angegeben (Nordhemisphäre 14,6 °C, Südhemisphäre 13,4 °C). In Orientierung an Abb. 19, wo die

ser Mittelwert wegen der Anomalie-Darstellung gleich „0“ gesetzt ist, haben wir jüngst, d.h. 2015–2017, einen Mittelwert von 14,7 °C erreicht, was gerundet doch wieder 15 °C ergibt. Für die Zeit ab 1880 gibt es alternative Temperatur-Datensätze, die vom Goddard Institute for Space Studies (GISS, NASA, USA) und der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, USA) stammen. (NASA bedeutet National Aeronautic and Space Agency). Obwohl dabei unterschiedlich viele Messstationen benutzt worden sind (bei CRU sind es neuerdings 5583) und auch etwas unterschiedliche Algorithmen zur Berechnung der Flächenmittelwerte eingesetzt werden, zeigen diese Daten nur sehr geringe Unterschiede. (Mathematisch-statistisch liegen für 1880–2017 die Korrelationskoeffizienten bei 0,98–0,99.) Trotzdem treten in den Trendwerten, die in Tab. 7 zusammengestellt sind, Unterschiede auf. Danach muss die Trendangabe für 1880–2017 auf die Unsicherheitsspanne von ca. 0,9–1 °C relativiert werden.

Natürlich stellt sich schon hier die Frage nach der Ursache. Da sie aber nicht in wenigen Worten zu beantworten, sondern ausführlich die Rolle des Klimafaktors Mensch in Konkurrenz mit natürlichen Vorgängen zu diskutieren ist, soll dies in einem eigenen Kapitel (Kap. 11) geschehen. Es müssen dabei nicht nur die Ursachen des Langfristtrends („Global Warming“), sondern auch der überlagerten Fluktuationen identifiziert werden. Hinsichtlich der oben genannten dekadischen Variabilität haben diese überlagerten Fluktuationen immer wieder zu Unterbrechungen des Langfristtrends geführt. Wenn dies eintritt, spricht man von einem Hiatus. Das ist in Abb. 19 für die Zeitspanne 1945–1976 (leichte Abkühlungsphase) und 1999–2014 (sog. Erwärmungspause) erkennbar. Auch dafür müssen die Ursachen gefunden werden, und das ist tatsächlich auch der Fall (siehe Kap. 11). Hier muss zunächst noch darauf hingewiesen werden, dass die Temperaturtrends regional sehr unterschiedlich sind. Dies ist in der Temperatur-Trendkarte 1880–2017 (nach GISS³⁹), siehe Abb. 20a, deutlich erkennbar. Offenbar konzentrieren sich die stärksten Erwärmungstrends auf die Landgebiete mit einem Maximum

Tabelle 7. Beobachtete global (Landgebiete und Ozeane) gemittelte Temperaturtrends nach den Datenquellen CRU¹⁸ (Climatic Research Unit, Universität Norwich, England), GISS³⁹ (Goddard Institute for Space Studies, NASA, USA) und NOAA⁸⁵ (National Oceanic and Atmospheric Administration, USA).

Zeitspanne	CRU	GISS	NOAA
1880–2012*	+0,83 °C	+0,87 °C	+0,85 °C
1880–2017	+0,92 °C	+0,99 °C	+0,95 °C
1998–2017	+0,29 °C	+0,38 °C	+0,36 °C

* Nach IPCC¹⁹ (2014): + 0,85 °C ± 0,2 °C (Mittel und Unsicherheit)