

utb.

Stefan Brönnimann

Klimatologie



basics

auszugleichen, indem Energie in verschiedener Form transportiert wird, während die Strahlung dieses Energiegefälle immer wieder von Neuem aufbaut. Letztlich können wir die Verteilung der Temperatur und des Niederschlags sowie die Winde als Ergebnis dieses Ausgleichsprozesses verstehen, der gewissermaßen zu einem dynamischen Gleichgewicht führt. In → [Kap. 6](#) führen wir diesen Gedanken weiter.

Die globale Jahresmitteltemperatur beträgt 14,5 °C, Extreme umspannen fast 150 °C

Die **Jahresmitteltemperatur** beträgt für die gesamte Erdoberfläche ungefähr 14,5 °C. Sie zeigt große räumliche Unterschiede (→ [Abb. 1-1](#)). In den Tropen erreicht sie 30 °C, in den polaren Gegenden sinkt sie auf -30 °C. Ursache dafür ist die oben genannte ungleiche **Einstrahlung**. Aber auch die räumliche Verteilung der Landmassen und Ozeane mit ihren jeweils ganz unterschiedlichen Eigenschaften führen zu einer räumlich ungleichen Temperaturverteilung. Betrachtet man dazu noch die Variabilität des Wetters, erstaunt es nicht, dass an einzelnen Tagen weit extremere Bedingungen auftreten können. Die höchsten und tiefsten auf der Erde gemessenen Extreme liegen scheinbar weit auseinander, zwischen -89 °C und +57 °C. Das ist allerdings noch relativ wenig, wenn wir das beispielsweise mit den Verhältnissen auf dem Mond vergleichen, dessen Oberflächentemperatur bei ungefähr gleicher Einstrahlung wie auf der Erde zwischen -160 °C und +130 °C schwankt. → [Tab. 1-2](#) stellt einige beobachtete Wetterextreme auf der Erde zusammen.

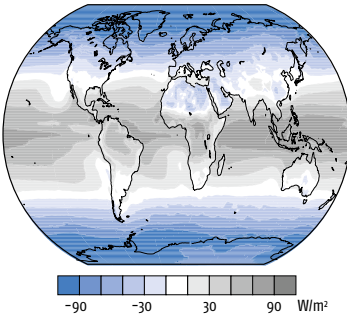
Der globale mittlere Niederschlag beträgt knapp 3 mm pro Tag

Die **Jahresniederschläge** sind räumlich ebenfalls sehr variabel. In → [Abb. 1-1](#) zeigen sich schmale Bänder mit viel Niederschlag und großen räumlichen Gradienten (ein Gradient ist ein Gefälle in einer Raumrichtung; vgl. → [Box 1.4](#)). Entlang des Äquators erstreckt sich zwischen 5° S und 10° N ein Band mit Jahresniederschlägen von über 2000 mm. Auch über den Westseiten der Ozeane regnet es viel. Dagegen erhal-

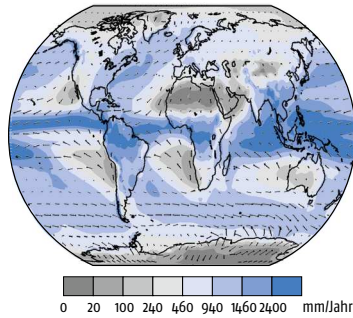
Tab. 1-2 | Einige Wetterrekorde in den instrumentellen Messungen (Quelle: WMO).

Rekord	Wert	Ort und Datum
Höchste Temperatur auf der Erdoberfläche	56,7 °C	Death Valley, USA (-54 m ü. M.), 10. Juli 1913
Tiefste Temperatur auf der Erdoberfläche	-89,2 °C	Vostok, Antarktis (3420 m ü. M.), 27. Juli 1983
Intensivster Niederschlag (1 Stunde)	305 mm	Holt, USA, 22. Juni 1947
Stärkster Niederschlag (1 Tag)	1825 mm	Foc-Foc, La Réunion, 7.–8. Januar 1966
Größte Niederschlagsmenge (1 Jahr)	26461 mm	Cherrapunji, Indien, Aug. 1860–Jul. 1861
Längste Zeitspanne ohne Niederschlag	173 Monate	Arica, Chile, Okt. 1903 – Jan. 1918
Stärkste Windböe	113,2 m s ⁻¹	Barrow Island, Australien, 10. April 1996
Größtes Hagelkorn	1,02 kg	Gopalganj, Bangladesh, 14. April 1986

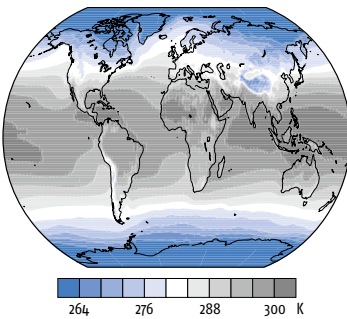
Nettostrahlung an der Atmosphärenobergrenze



Niederschlag und Wind in Bodennähe



Lufttemperatur



Verdunstung

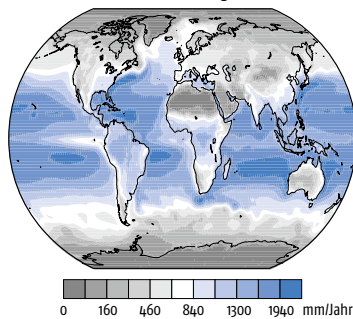


Abb. 1-1

Langjährige Jahresmittelwerte der Nettostrahlung (kurz- und langwellig) an der Atmosphärenobergrenze (Daten: CERES), der Lufttemperatur am Erdboden, des Niederschlags (man beachte die nichtlineare Skala), des bodennahen Winds (als Vektoren) und der Verdunstung (Daten: ERA-Interim; vgl. Brönnimann 2015).

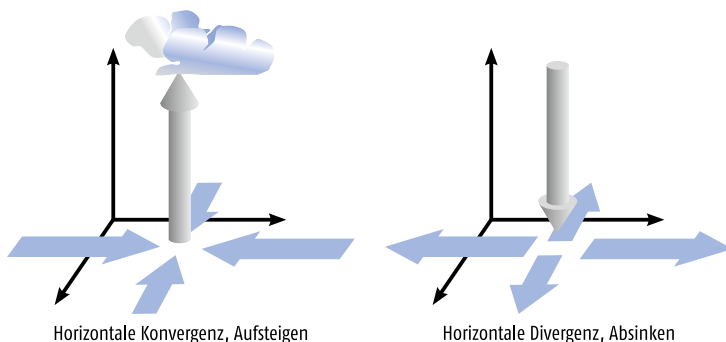
ten einige subtropische Regionen und die Polkappen nur 100 mm pro Jahr oder weniger Niederschlag (→ Abb. 1-1). Der global gemittelte Niederschlag beträgt knapp 3 mm pro Tag, wobei die Unsicherheit dieser Größe beträchtlich ist.

Die Niederschlagsverteilung lässt sich mit dem **Windfeld** erklären. Niederschlag fällt dort, wo feuchte Luft gehoben wird. Diese kühlt sich dadurch aus, es kommt zu Kondensation und Niederschlagsbildung. In den → Kap. 2, 4 und 6 gehen wir näher darauf ein. Hebung erfolgt außer bei der Überströmung von Gebirgen vor allem dort, wo die Winde in Bodennähe **konvergieren**, also zusammenströmen (vgl. → Kap. 5, wo die Begriffe mathematisch definiert werden). Daher zeigt → Abb. 1-1 die größten Niederschläge im Bereich der konvergierenden Strömung in Äquatornähe (vgl. → Kap. 6), wo die Luft sehr feucht ist. In Regionen mit **divergenter Luftströmung** in Bodennähe, also einem Auseinanderfließen, sinken Luftmassen ab, und es fällt wenig Niederschlag. Der Zusammenhang zwischen Hebung respektive Absinken (in der Mete-

Die Niederschlagsverteilung wird durch Wind und Feuchte bestimmt

Abb. 1-2

Schematische Darstellung von horizontaler Konvergenz im Bodenwindfeld, verbunden mit Hebung und Niederschlagsbildung (links) sowie divergenter Strömung in Bodennähe, verbunden mit absinkenden Luftmassen und Wolkenauflösung (rechts).



orologie Subsidenz genannt) und horizontaler Konvergenz (respektive Divergenz) ist in → Abb. 1-2 dargestellt.

Neben Hebung braucht es für die Niederschlagsbildung auch Wasserdampf, der durch Verdunstung in die Atmosphäre gelangt. **Verdunstung** erfolgt hauptsächlich in den subtropischen Ozeanen sowie über den tropischen Landflächen des Amazonasbeckens und Westafrikas, dagegen tragen die Kontinente der Subtropen und die Mittelbreiten nur wenig bei (→ Abb. 1-1). Sehr wenig verdunstet auch in den kalten Polarregionen.

Können wir all dies physikalisch erklären? Können wir die Vorgänge qualitativ oder sogar quantitativ nachvollziehen? Die hier als erste Abbildung dargestellten mittleren Klimaverhältnisse sind gleichzeitig der Kernpunkt dieses Buches. Wir können als Ziel dieses Buches formulieren, die hier dargestellten Klimaverhältnisse zu verstehen und auf ihre physikalischen Ursachen zurückführen zu können.

Diese Charakterisierung des heutigen Klimas soll nicht darüber hinwegtäuschen, dass es im Verlauf der Erdgeschichte größere Schwankungen gab. Bis Anfang des 19. Jahrhunderts war dies noch kaum bekannt. Doch danach mehrten sich Hinweise auf **Eiszeiten**, und es wurden Spuren einer vormals **grünen Sahara** entdeckt. Es dauerte allerdings noch geraume Zeit, bis sich aus einer statischen Sichtweise des Klimas das Bild einer dynamischen Erde mit einem sich ständig ändernden Klima entwickelte.

Die wichtigsten Phasen des globalen Klimas sind in → Abb. 1-3 zusammengefasst. Nach der Entstehung der Erde und der Bildung des Mondes entstand vor 4–4.5 Milliarden Jahren eine treibhausgasreiche Atmosphäre, welche trotz der damals noch schwachen Sonne flüssiges Wasser erlaubte (vgl. → Abb. 2-1, → Kap. 2.1). In ihrer Geschichte durchlief die Erde aber immer wieder kühlere und wärmere Phasen.

Das Klima Mitteleuropas schwankte zwischen «Schneeballerde» und tropischem Klima

Es kam möglicherweise sogar zu einer oder mehreren **Vereisungen** fast des gesamten Erdballs («Schneeballerde», vor 650 Millionen Jahren). Während eines großen Teils der Erdgeschichte war das Klima hingegen **wärmer als heute**; Eis ist auf der Erde daher keine Selbstverständlichkeit. Im heutigen Europa herrschte über größere Zeiträume der letzten 250 Millionen Jahre tropisches Klima.

Seit ca. 2 Millionen Jahren befindet sich die Erde in einer Eiszeitphase. Die Eiszeiten wurden dabei immer wieder durch kurze **Warmzeiten** (Interglaziale) unterbrochen; in einer solchen befinden wir uns jetzt. → [Kap. 10](#) geht näher auf die Klimageschichte der letzten 100 000 Jahre ein und zeigt, dass es immer wieder wärmere und kältere Phasen gab. Allerdings gibt es einen wichtigen Unterschied zwischen der Erwärmung der letzten 150 Jahre und früheren Warmphasen: Während frühere Warmphasen natürlichen Ursprungs waren, ist heute der **Mensch** zum dominierenden Klimafaktor geworden. Man spricht deshalb – in Analogie zu den erdgeschichtlichen Epochenbegriffen – oft vom **Anthropozän** (anthropos = der aufgerichtete Mensch). Das Anthropozän, das ungefähr um 1850 begann, ist die Ära, in welcher der Mensch die wichtigste treibende Kraft naturräumlicher Veränderungen ist.

Die Entwicklung des Erdklimas ist aber damit noch nicht zu Ende. Der Mensch wird auch in absehbarer Zukunft die treibende Kraft im Klimasystem bleiben (vgl. → [Kap. 10](#)). In einer ganz fernen Zukunft, in Milliarden von Jahren, wird die Erde hingegen durch die zunehmende Leuchtkraft der Sonne zu heiß werden für heutige Lebensformen. Gemäß Modellrechnungen wird die Erde aber bereits wesentlich früher, in 500–800 Millionen Jahren, zu einem **unbewohnbaren Planeten** werden, wenn durch die zunehmende Sonnenstrahlung die Ozeane verdampfen. Der Treibhauseffekt wird dadurch verstärkt, und der Kohlenstoffkreislauf kommt zum Erliegen. Allerdings zeigt die Vergangenheit, dass auch weitere Faktoren, beispielsweise Asteroideneinschläge, den Entwicklungspfad des Lebens auf der Erde beeinflussen können.

Seit 2 Millionen Jahren befinden wir uns im Eiszeitalter

Im Anthropozän (seit ca. 1850) ist der Mensch der dominierende Naturfaktor

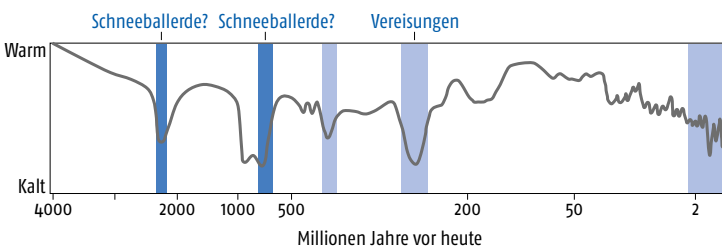


Abb. 1-3

Entwicklung des Klimas auf der Erde (nichtlineare Skala). Blaue Balken zeigen Vereisungen (Quelle: ZAMG).

1.2 | Definitionen und Skalen

Im vorangehenden Unterkapitel wurde das Erdklima in groben Zügen charakterisiert. Aber was ist Klima? Können wir Klima definieren? Obschon sich alle unter alltäglichen Sätzen wie «Das Klima hat sich in den letzten 30 Jahren verändert» oder «Diese Insel verfügt über ein außerordentlich mildes Klima» etwas vorstellen können, ist eine wissenschaftliche Definition nicht einfach.

Wetter als Zustand der Atmosphäre

Betrachten wir zuerst den Begriff Wetter. Eine objektive **Definition** für Wetter könnte lauten:

«Wetter ist der physikalische Zustand der Atmosphäre zu einem gewissen Zeitpunkt an einem gewissen Ort.»

Der **physikalische Zustand** lässt sich durch Temperatur, Niederschlag, Wind, Bewölkung, Luftdruck und weitere Größen beschreiben (vgl. → Box 4.1 und → Tab. 9-1). Es ließe sich streiten, ob nicht auch chemische Eigenschaften dazugehören. Doch ergibt es Sinn, «Wetter» als Zustand zu definieren? Es ändert sich ja ständig. Eine andere Möglichkeit zur Definition von «Wetter» ist, genau diese **Veränderungsvorgänge** anzusprechen: Wetter kann also als Vorgang der Veränderung des atmosphärischen Zustands verstanden werden. Denn würde sich die Atmosphäre nicht verändern, würde uns «Wetter» auch nicht interessieren. Wenn wir aber Wetter als Veränderung der Atmosphäre auffassen, brauchen wir eine **Referenz**, etwas, womit wir das Wetter von heute vergleichen können. «Klima» liefert genau dies:

Wetter als Vorgänge in der Atmosphäre

«Klima ist die Summe der meteorologischen Zustände, inklusive Temperatur, Niederschlag und Wind, welche typischerweise in einer bestimmten Region vorherrschen.»

(nach www.thefreedictionary.com).

«Klima im engeren Sinn ist üblicherweise definiert als durchschnittliches Wetter, oder genauer als die statistische Beschreibung durch Mittelwert und Variabilität der relevanten Größen über eine Zeitperiode»

(nach Weltorganisation für Meteorologie, WMO).

Statistische Klimadefinition: Klima als Referenz für Wetter

Dabei gilt eine Länge von 30 Jahren als Standard-Zeitperiode. Diese Definitionen lassen sich nicht mehr nur aus der Natur ableiten. Was ist gemeint mit «typischerweise»? Warum gerade 30 Jahre? «Klima» entspringt dem Bedürfnis des Menschen, das Wetter einzuordnen und den Einfluss der Atmosphäre auf Mensch und Umwelt zu verstehen. Jede Klimadefinition ist deshalb auch ein Abbild unserer intuitiven Vorstellung von «Klima». Einige Autoren versuchen deshalb, Klima im Sinn von Prozessen zu definieren:

Klima als langsame Vorgänge in Ozean und Atmosphäre

«Klima beinhaltet die langsam variierenden Aspekte des Atmosphären-Hydrosphären-Land-Systems.» (American Meteorological Society).