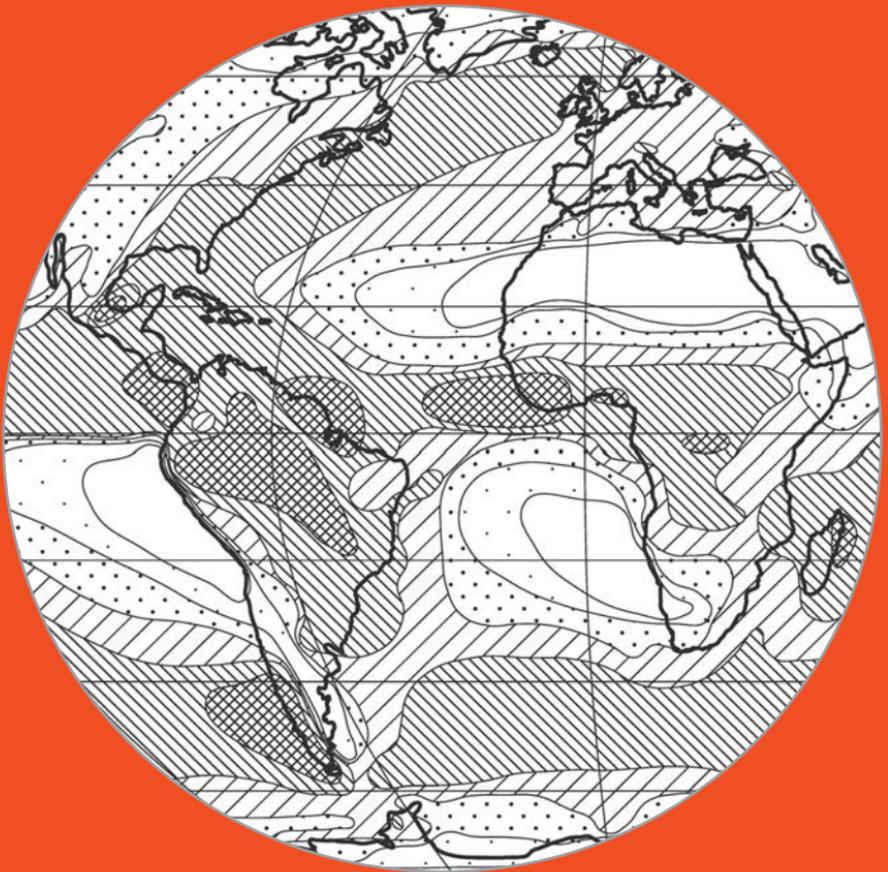


Wolfgang Weischet / Wilfried Endlicher

Einführung in die Allgemeine Klimatologie

Studienbücher der Geographie

9., überarbeitete Auflage



Borntraeger

Studienbücher der Geographie

früher: Teubner Studienbücher der Geographie

www.borntraeger-cramer.de/publications/list/series/stbg

Henkel, Gerhard: **Der Ländliche Raum.** Gegenwart und Wandlungsprozesse seit dem 19. Jahrhundert in Deutschland. 2018. 5. neu bearb. Aufl.
ISBN 978-3-443-07156-1 in Vorbereitung

Bahrenberg, Gerhard; Giese, Ernst; Mevenkamp, Nils; Nipper, Josef (Hrsg.): **Statistische Methoden in der Geographie.** Band 1 Univariate und bivariate Statistik. 2017. 6. durchges. überarb. Aufl., 280 S., 81 Abb., 69 Tab., 8 Tafeln
ISBN 978-3-443-07154-7 29.80 €

Blümel, Wolf Dieter: **Physische Geographie der Polargebiete.**
2015. 2. vollständig überarbeitete Auflage, 295 S., 109 Abb., 7 Tab.
ISBN 978-3-443-07153-0 29.90 €

Korf, Benedikt; Schetter, Conrad: **Geographien der Gewalt.** Kriege, Konflikte und die Ordnung des Raumes im 21. Jahrhundert. 2015. 246 S., 23 Abb., 5 Tab.
ISBN 978-3-443-07152-3 29.90 €

Baumhauer, Roland; Winkler Stefan: **Glazialgeomorphologie.**
Formung der Landoberfläche durch Gletscher. 2014. 262 S., 153 Abb., 4 Tab.
ISBN 978-3-443-07151-6 29.90 €

Kelletat, Dieter: **Physische Geographie der Meere und Küsten.**
2013. 3. neu bearb. erw. Aufl., 290 S., 234 Abb., 22 Tab.
ISBN 978-3-443-07150-9 29.90 €

Kanwischer, Detlef (Hrsg.): **Geographiedidaktik.** Ein Arbeitsbuch zur Gestaltung des Geographieunterrichts. 2013. 265 S., 39 Abb., 4 Tab.
ISBN 978-3-443-07149-3 29.90 €

Pfeffer, Karl-Heinz: **Karst.** Entstehung - Phänomene - Nutzung.
2010. VI, 338 S., 283 Abb., 54 Tab.
ISBN 978-3-443-07147-9 29.90 €

Brücher, Wolfgang: **Energiegeographie.** Wechselwirkung zwischen Ressourcen, Raum und Politik. 2009. 280 S., 41 Abb.
ISBN 978-3-443-07145-5 29.80 €

Bahrenberg, Gerhard; Giese, Ernst; Mevenkamp, Nils; Nipper, Josef (Hrsg.): **Statistische Methoden in der Geographie.** Band 2 Multivariate Statistik
2008. 3. Aufl., 386 S., 72 Abb., 114 Tab.
ISBN 978-3-443-07144-8 29.00 €

Gather, Matthias; Kagermeier, Andreas; Lanzendorf, Martin: **Geographische Mobilitäts- und Verkehrsforschung.** 2008. 303 S., 112 Abb., 24 Tab.
ISBN 978-3-443-07143-1 29.00 €



Borntraeger

Johannesstr. 3A, 70176 Stuttgart, Germany. Tel. +49 (711) 351456-0 Fax. +49 (711) 351456-99
order@borntraeger-cramer.de www.borntraeger-cramer.de

Studienbücher der Geographie

früher: Teubner Studienbücher der Geographie

www.borntraeger-cramer.de/publications/list/series/stbg

Löffler, Ernst; Honecker, Ulrich; Stabel, Edith: **Geographie und Fernerkundung.** Eine Einführung in die geographische Interpretation von Luftbildern und modernen Fernerkundungsdaten.
2005. 3. Neubearb. erw. Aufl., 287 S., 105 Abb., 9 Tab., 16 Farbtaf.
ISBN 978-3-443-07140-0 29.00 €

Jörg Bendix: **Geländeklimatologie.** 2004. 1. Aufl., 282 S., 127 Abb., 15 Tab.
ISBN 978-3-443-07139-4 28.00 €

Scholz, Fred: **Geographische Entwicklungsforschung.** Methoden und Theorien. 2004. 297 S., 66 Abb., 5 Tab.
ISBN 978-3-443-07138-7 29.00 €

Heinritz, Günter; Klein, Kurt E.; Popp, Monika: **Geographische Handelsforschung.** 2003. 257 S., 54 Abb., 16 Tab.
ISBN 978-3-443-07137-0 28.00 €

Kuls, Wolfgang; Kemper, Franz-Josef: **Bevölkerungsgeographie.** Eine Einführung. 2002. Unveränd. Nachdruck 3. Aufl., 304 S., 130 Abb., 33 Tab.
ISBN 978-3-443-07112-7 24.00 €

Kraas, Frauke; Stadelbauer, Jörg: **Fit ins Geographie-Examen.** Hilfen für Abschlussarbeit, Klausur und mündliche Prüfung. 2000. 152 S.
ISBN 978-3-443-07127-1 12.00 €

Weischet, Wolfgang; Endlicher, Wilfried: **Regionale Klimatologie Teil 2.** Die Alte Welt: Europa – Afrika – Asien
2000. 625 Seiten, 118 Abbildungen, 24 Tabellen, 9 Karten
ISBN 978-3-443-07119-6 66.00 €

Voppel, Götz: **Wirtschaftsgeographie.** Räumliche Ordnung der Weltwirtschaft unter marktwirtschaftlichen Bedingungen. 1999. 267 Seiten, 48 Abb., 25 Tab.
ISBN 978-3-443-07129-5 26.00 €

Becker, Hans: **Allgemeine Historische Agrargeographie.**
1998. 333 S., 43 Abb., 12 Tab.
ISBN 978-3-443-07131-8 25.00 €

Lichtenberger, Elisabeth: **Stadtgeographie.** 1: Begriffe, Konzepte, Modelle, Prozesse. 1998. 3. Aufl., 366 S., 132 Abb., 14 Tab.
ISBN 978-3-443-07113-4, brosch., Preis: 26.00 €

Jürgen Hagel: **Geographische Interpretation topographischer Karten.**
1998. 144 S., 33 Abb.
ISBN 978-3-443-07130-1 25.00 €



Borntraeger

Johannesstr. 3A, 70176 Stuttgart, Germany. Tel. +49 (711) 351456-0 Fax. +49 (711) 351456-99
order@borntraeger-cramer.de www.borntraeger-cramer.de

Studienbücher der
Geographie

Weischet / Endlicher
Einführung in die
Allgemeine Klimatologie



Studienbücher der
Geographie

(Früher: Teubner Studienbücher der Geographie)

Die Studienbücher der Geographie behandeln wichtige Teilgebiete, Probleme und Methoden des Faches, insbesondere der Allgemeinen Geographie. Über Teildisziplinen hinweggreifende Fragestellungen sollen die vielseitigen Verknüpfungen der Problemkreise sichtbar machen. Je nach der Thematik oder dem Forschungsstand werden einige Sachgebiete in theoretischer Analyse oder in weltweiten Übersichten, andere hingegen stärker aus regionaler Sicht behandelt. Den Herausgebern liegt besonders daran, Problemstellungen und Denkansätze deutlich werden zu lassen. Großer Wert wird deshalb auf didaktische Verarbeitung sowie klare und verständliche Darstellung gelegt. Die Reihe dient den Studierenden zum ergänzenden Eigenstudium, den Lehrern des Faches zur Fortbildung und den an Einzelthemen interessierten Angehörigen anderer Fächer zur Einführung in Teilgebiete der Geographie

Einführung in die Allgemeine Klimatologie

9., überarbeitete Auflage

von

Dr. rer. nat. Wolfgang Weischet
Professor an der Universität Freiburg i.Br.

und

Dr. rer. nat. Wilfried Endlicher
Professor an der Humboldt-Universität
zu Berlin

Mit 117 Figuren und 14 Tabellen



Gebr. Borntraeger Verlagsbuchhandlung
Berlin · Stuttgart 2018

Weischet /Endlicher: Einführung in die Allgemeine Klimatologie

Prof. Dr. rer. nat. Wolfgang Weischet

Geboren 1921 in Solingen-Ohligs. 1940–1942 Studium der Meteorologie und Geophysik in Hamburg und Berlin. Diplom-Meteorologe, Assessor im Reichswetterdienst. 1945–1948 Studium der Geographie, Physik und Mathematik in Bonn. 1948 Promotion bei Prof. Troll in Bonn. Anschließend Wiss. Assistent von Prof. Louis, zunächst in Köln, ab 1951 in München. 1954 Habilitation für Geographie in München. 1955/56 Gastforscher an der Universidad de Chile, Santiago. 1959–1961 Prof. für Geographie und Direktor des Instituto de Geografía y Geología, Universidad Austral de Chile in Valdivia. Seit 1961 o. Prof. und Direktor des Institutes für Physische Geographie der Universität Freiburg/Br.; 1969/70 Visiting Prof. University of Wisconsin, Milwaukee. 1982 Mitglied in der Deutschen Akademie der Naturforscher und Ärzte LEOPOLDINA. März 1989 Emeritierung. Gestorben am 13. Januar 1998.

Prof. Dr. rer. nat. Wilfried Endlicher

Geboren 1947 in Heidenheim/Brenz. 1969–1975 Studium der Geographie, Romanistik und Meteorologie in Freiburg/Br. und Grenoble. Staatsexamen 1975, anschließend Wiss. Mit. am Inst. für Phys. Geogr. der Universität Freiburg; 1979 Promotion bei Wolfgang Weischet mit einer Diss. zum Weinbauklima des Kaiserstuhls. 1982–84 DAAD-Gastdozent an der Universidad de Concepción/Chile, 1985 Habilitation in Freiburg mit einer Schrift zur Landschaftsdegradation in Chile. 1986 Dozent an der Univ. Erlangen-Nürnberg, 1987 Heisenberg-Stipendiat der DFG und Visiting Professor an der Univ. of Florida in Gainesville. 1988–1997 Prof. für Geoökologie am Fachbereich Geographie der Univ. Marburg, seit 1998 Prof. für Klimageographie am Geogr. Inst. der Humboldt-Universität zu Berlin, seit 2014 Seniorprofessor. 2004 Mitglied in der Deutschen Akademie der Naturforscher und Ärzte LEOPOLDINA – Nationale Akademie der Wissenschaften.

9. überarb. Auflage. Borntraeger, 2018
8. durchgesehene Auflage. Borntraeger, 2012
7. vollständig neu bearb. Auflage. Borntraeger, 2008
6. überarb. Auflage, unveränderter Nachdruck. Borntraeger, 2002
6. überarb. Auflage. Teubner, 1995
5. überarb. u. erweiterte Auflage. Teubner, 1991
4. überarb. u. erweiterte Auflage. Teubner, 1988
3. überarb. u. erweiterte Auflage. Teubner, 1983
2. durchgesehene Auflage. Teubner, 1979
1. Auflage. Teubner, 1977

ISBN ebook (pdf) 978-3-443-01146-8

ISBN 978-3-443-07155-4

ISSN 1618-9175

Information on this title: www.borntraeger-cramer.de/9783443071554

© 2018 Gebr. Borntraeger, Berlin, Stuttgart

Gedruckt auf alterungsbeständigem Papier nach ISO 9706-1994

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,

D-70176 Stuttgart, Germany

mail@schweizerbart.de

www.borntraeger-cramer.de

Satz: Satzpunkt Ursula Ewert GmbH, Bayreuth

Printed in Germany by: Gottlob Hartmann GmbH, Stuttgart

Vorwort zur 1. Auflage

Der vorliegende Text ist – über einige Jahre verteilt und wiederholt verändert – mit dem Ziel abgefasst worden, auch all jenen Geographen, Geographiestudenten und anderen Interessenten, die von der Schule her keinen engeren Bezug zu den Naturwissenschaften mitbringen, den Einstieg in die physikalische Betrachtungsweise der Klimatologie zu ermöglichen. Mit dem klimageographischen Faktenwissen allein kommt man nämlich auf die Dauer nicht recht weiter. Der künftige Geographielehrer wird vielmehr im Zusammenhang mit Fragen der Umweltbelastung, den tatsächlichen oder behaupteten anthropogenen Klimabeeinflussungen und den ökologischen Schlüssel-funktionen des Klimas in den Lebensräumen der Erde zunehmend mehr auf gründliche Einsichten in die geophysikalischen Prozesse und deren entscheidende Einflußfaktoren angewiesen sein. Viele der Kurzschlüsse über die Dominanz sozio-ökonomischer Bezüge oder den geringen Stellenwert physisch-geographischer Gegebenheiten beruhen nämlich darauf, daß die naturwissenschaftlichen Zusammenhänge nicht genügend tief und genau erkannt werden und oberflächliches Faktenwissen einem gar nicht die Möglichkeit gibt, in eine echte kritische Prüfung der Alternativen einzutreten.

Natürlich ist der dargebotene Stoff nicht umfassend und vollständig. Da ich z.Z. gleichzeitig an einer Neuauflage der umfangreichen Klimageographie des verstorbenen Kollegen Blüthgen arbeite, glaube ich sogar ziemlich genau zu wissen, was alles fehlt. Jedoch, bevor ich eine Ableitung durch das Hinzufügen von allen möglichen Erscheinungen aus der klimageographischen Substanz belaste, die nicht in eine genetisch konzipierte Gedankenführung hineinpassen, lasse ich sie lieber weg. Mein Bemühen galt nicht der Vollständigkeit, sondern der konsequenten Herleitung von Einsichten in physikalische Grundlagen und atmosphärische Prozesse, welche bei der Genese des Klimas eines Raumes die entscheidende Rolle spielen. Damit soll die Basis geschaffen werden für das Verständnis der Klimadifferenzierung auf der Erde auf genetischer Grundlage. Diese regionalklimatologische Differenzierung wird in Verknüpfung von geographisch charakteristischen Klimateffekten und dynamisch konzipierter Klimagenese in einem gesonderten Band behandelt. Am Schluss des vorliegenden Textes steht die Darstellung der Allgemeinen Zirkulation der Atmosphäre.

Es kann natürlich sein, dass manchen Leser die physikalische Materie zunächst hart an geht und dass er manche Sätze beim ersten Lesen nicht auf Anhieb versteht. Lassen Sie sich davon nicht gleich abschrecken. Die Sätze müssen zuweilen im Interesse der Eindeutigkeit konstruiert werden und wirken dann überladen, schwerverdaulich. Sie haben aber den Vorteil, dass sie letztlich rekonstruierbar sind und einen eindeutigen Sinn ergeben. Den benötigt man für eine konsequente Ableitung. Auch Formeln sind – richtig verstanden – keine Zumutung oder Belastung, sondern eine Erleichterung, stellen sie doch nichts weiter als eine verkürzte, auf Eindeutigkeit abgestellte Ausdrucksweise dar. Was sie aussagen, ist zudem jeweils in einfachen Worten noch hinzugefügt.

Die behandelte Materie gehört seit langem zum gesicherten Grundlagenwissen der Geowissenschaften. Dementsprechend sind im Text keine Literaturbezüge enthalten. Ich möchte aber meinen Lehrern und Autorenkollegen meinen herzlichen Dank für all das abstaten, was ich durch Wort und Schrift von ihnen gelernt habe und ich nun in meiner Sicht der Dinge und meiner Vorstellung von ihrer didaktisch adäquaten Präsentation weiterzugeben versuche. Die Bücher, aus denen ich gelernt habe, sind nachstehend aufgeführt.

Zu großem Dank verpflichtet bin ich auch meinen Mitarbeitern im Geographischen Institut I der Universität Freiburg: H. Goßmann und W. Nübler für manchen kritischen Hinweis, W. Hoppe für die sorgfältige kartographische Arbeit an den zahlreichen Figuren, Frau Beil und Frau Ohr für die stete Hilfe bei der Erstellung des Manuskriptes.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft verdanke ich eine finanzielle Unterstützung während eines Forschungssemesters in der University of Wisconsin, wo ich besonders von den Kollegen David H. Miller und Werner Schwerdtfeger dankenswerter Weise manche Anregungen erhalten habe.

Freiburg i. Br., im Frühjahr 1976

Wolfgang Weischet

Vorwort zur 7. Auflage

Wolfgang Weischet hat diese Einführung mehrfach überarbeitet und auf den jeweils neuesten Stand der Wissenschaft gebracht, letztmals 1995. In den seither vergangenen Jahren hat die Forschung über den anthropogen induzierten Klimawandel, diese Menschheitsherausforderung, neue Einsichten gewonnen. Die nunmehr bekannten Fakten sowie die naturwissenschaftlichen Grundlagen der ablaufenden Prozesse sind in zwei Kapiteln angefügt worden. Außerdem rechtfertigte die Relevanz der mesoskalaren Dimension des Klimas ein zusätzliches Kapitel, d. h. Stadt- und Geländeklima werden mit behandelt. Bei den gesicherten klimatologischen Sachverhalten, also dem weitaus größten Teil des Buches, wurden einige wenige Kürzungen und Ergänzungen sowie Überarbeitungen der Figuren vorgenommen. Eine Einleitung mit Definitionen und Ausführungen zum Klima als System, ebenfalls eine Erkenntnis der letzten Jahre, wurde vorangestellt. Das Literaturverzeichnis wurde erweitert und Internetquellen kamen neu hinzu. Auch eine andere Zitierweise und ein Verzeichnis von Maßeinheiten und Umrechnungsformeln schienen mir hilfreich. Diese Einführung behandelt die Allgemeine Klimatologie. Detaillierte Ausführungen zur Regionalen Klimatologie haben beide Autoren bereits 1996 bzw. 2000 vorgelegt.

Mein Dank gilt den Kollegen Eberhard Parlow, Lutz Jäger und Christian-Dietrich Schönwiese, die instruktive Diagramme zur Verfügung stellten, sowie dem Kollegen Jörg Bendix für seine Herausgeberebertätigkeit. Mein Dank gilt v. a. aber meinen Mitarbeitern Dr. Thomas Draheim, Dr. Reinhard Kleßen, Dr. Marcel Langner und Dipl.-Geogr. Anja Pagenkopf für ihre kritischen Hinweise zur Neuauflage. Frau Sylvia Zinke-Friedrich, Herr Matthias Baumann und Herr Matthias Grätz unterstützten mich bei der Herstellung und Herrn Gerd Schilling bin ich für die sorgfältige kartographische Arbeit zu Dank verpflichtet. Nicht zuletzt danke ich auch Dr. Nägele vom Verlag Schweizerbart für das Angebot der Neubearbeitung.

Berlin, im Sommer 2007

Wilfried Endlicher

Vorwort zur 9. Auflage

Je besser wir den komplexen Mechanismus unseres Klimas verstehen und je sicherer wir die Eingriffe des Menschen in dieses System beurteilen können, desto größer wird die damit verbundene Verantwortung für unsere Erde, von der globalen bis zur lokalen Skala. Derartige Fragen beschäftigen Wissenschaft, Zivilgesellschaft und Politik gleichermaßen. Thematisch einschlägige Studienbücher müssen deshalb unablässig an den aktuellen Wissensstand angepasst werden. In dieser überarbeiteten Neuauflage wurden einige Fehler beseitigt, verschiedene Abschnitte verbessert und mehrere Kapitel und Diagramme durch aktuelle Daten ergänzt. Die Kapitel zu den atmosphärischen Risiken und zum Klimawandel wurden vollständig neu verfasst, da in den vergangenen Jahren viele Befunde hinzu gekommen sind. Die Literatur- und Internet-Verzeichnisse wurden überarbeitet. Mein Dank gilt auch dieses Mal dem gleichen Personenkreis wie bei der siebten Auflage, insbesondere aber meinen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern am Lehrstuhl für Klimageographie des Geographischen Instituts der Humboldt-Universität zu Berlin, die mir in vielfacher Hinsicht den Rücken frei hielten und die Arbeit an dieser Neuauflage erst ermöglichten. Ich würde mich freuen, wenn das Studienbuch auch weiterhin zu einem vertieften Verständnis des Klimas unseres „blauen Planeten“ beitragen würde.

Berlin, im Frühjahr 2018

Wilfried Endlicher

Inhalt

Vorwort zur ersten Auflage	5
Vorwort zur siebten Auflage	7
Vorwort zur neunten Auflage	8
1 Das Klima mit seinen Raum- und Zeitdimensionen	15
2 Erddimensionen und Beleuchtungsklimazonen	23
2.1 Erddimensionen	23
2.2 Himmelsmechanische Tatsachen	23
2.3 Jahreszeiten	25
3 Die Sonne als Energiequelle und die Ableitung des solaren Klimas	32
3.1 Energiequelle und Solarkonstante	32
3.2 Fakten des solaren Klimas	32
4 Die Atmosphäre, ihre Zusammensetzung und Gliederung	39
4.1 Die Zusammensetzung der Atmosphäre	39
4.2 Die vertikale Struktur der Atmosphäre	41
4.3 Die Masse der Atmosphäre	45
5 Die solaren Strahlungsströme unter dem Einfluss der Atmosphäre	46
5.1 Das Sonnenspektrum am Grunde der Atmosphäre	46
5.2 Die diffuse Reflexion	48
5.3 Die selektive Absorption	51
5.4 Das Problem der stratosphärischen Ozonabnahme und des „Ozonlochs“	52
5.5 Regionale Abwandlung des solaren Klimas bei Annahme einer homogenen Atmosphäre	56
5.6 Die Globalstrahlung, ihre Komponenten und der Einfluss der geographischen Breite	58
5.7 Das Verhältnis von direkter und diffuser Einstrahlung in verschie- denen Klimazonen und seine Folgen	60
5.8 Die mittlere Verteilung der Globalstrahlung	62
5.9 Der Strahlungsumsatz an der Erdoberfläche	63

5.9.1	Der reflektierte Teil der Solarstrahlung: die Albedo	63
5.9.2	Strahlungsabsorption, Wärme, Wärmeverteilung	65
5.9.3	Umsatz kurzwelliger Strahlung und Wärmeverteilung in unbewachsenem Boden	66
5.9.4	Umsatz kurzwelliger Strahlung und Wärmeverteilung im Wasser	68
5.9.5	Strahlungsumsatz und Wärmeverteilung in einer Schneedecke	72
5.9.6	Strahlungsumsatz und Wärmeverteilung in der Vegetation	72
6	Die terrestrischen Strahlungsströme und der Treibhauseffekt der Atmosphäre	74
6.1	Die Ausstrahlung der Erdoberfläche und die Gegenstrahlung der Atmosphäre	74
6.2	Die natürliche Glashauswirkung der Atmosphäre	78
6.3	Die Emission von Spurengasen und der anthropogene Zusatztreibhauseffekt	80
7	Die Strahlungsbilanz, lokal, regional und global	85
7.1	Die Strahlungsbilanz des Gesamtsystems Erde und Atmosphäre	85
7.2	Tages- und Jahresgang von Strahlungsflüssen und -bilanz	88
7.3	Grundzüge der regionalen Differenzierung der Strahlungsbilanz an der Erdoberfläche	89
8	Tages- und Jahresgänge der Energiebilanz an der Erdoberfläche	96
8.1	Tagesgänge der Energieflüsse	97
8.2	Jahresgänge der Energieflüsse und klimatologische Breitenzonen-Mittel	99
9	Lufttemperatur und Temperaturverteilung in der Atmosphäre	101
9.1	Messvorkehrungen, klimatologische Beobachtungstermine, wahre Tagesmittel	101
9.2	Regionale Differenzierung der Tages- und Jahresgänge der Lufttemperatur	105
9.3	Die vertikale Verteilung der Lufttemperatur	108
9.4	Die horizontale Verteilung der Lufttemperatur	111
9.5	Die planetarische Frontalzone	116
10	Der Luftdruck, seine Messung und Darstellung	121
10.1	Die Wirkungsweise von Flüssigkeits- bzw. Gasdruck	121
10.2	Der Luftdruck und seine Messung	122

10.3	Luftdruckangaben in Hektopascal	125
10.4	Die Hydrostatische Grundgleichung, die Allgemeine Gasgleichung und ihre Anwendung in der Barometrischen Höhenformel	125
10.5	Konstruktion von Höhenluftdruckkarten als Hauptanwendung der Barometrischen Höhenformel	129
11	Horizontale Luftdruckunterschiede und die Entstehung von Wind	134
11.1	Die thermische Entstehung horizontaler Luftdruckunterschiede in der Höhe	134
11.2	Horizontale Luftdruckgradienten als Ursache der Einleitung horizontaler Luftbewegung	137
11.3	Die Rückwirkung auf das Luftdruckfeld am Boden (Bodendruckfeld) und das Prinzip thermisch bedingter Ausgleichswinde	138
11.4	Die unterschiedlichen Dimensionen thermisch bedingter Luftdruck- gegensätze und Ausgleichszirkulationen	139
11.5	Horizontale Luftbewegung ohne Reibungseinfluss in einem Luftdruckfeld mit geradlinigen Isobaren (geostrophischer Wind)	147
11.6	Horizontale Luftbewegung ohne Reibungseinfluss bei gekrümmten Isobaren (geostrophisch-zyklostrophischer Wind)	149
11.7	Der Einfluss der Reibung auf die Luftbewegung: Reibungswind	150
11.8	Die Luftbewegung bei konvergierenden und divergierenden Isobaren sowie die Entstehung der dynamischen Druckgebilde	155
11.9	Maßgrößen der Luftbewegung	158
12	Der Wasserdampf in der Atmosphäre	160
12.1	Die physikalische Sonderstellung des Wasserdampfes	160
12.2	Maßeinheiten und Messung der Luftfeuchte	166
12.3	Mittlere horizontale und vertikale Verteilung des Wasserdampfes in der Atmosphäre	168
12.4	Das Problem der Verdunstung, Humidität und Aridität	170
13	Vertikale Luftbewegungen und ihre Konsequenzen	178
13.1	Der vertikale Austausch	178
13.2	Die dynamische Turbulenz	179
13.3	Die thermische Konvektion	180
13.4	Die trockenadiabatische Zustandsänderung bei vertikalen Luftbewegungen	182

13.5	Taupunkttemperatur, Kondensationspunkt, Kondensationsniveau und die kondensations-(feucht-)adiabatische Zustandsänderung	185
13.6	Die Umkehr adiabatischer Prozesse bei absteigender Luftbewegung und ihre Konsequenzen	191
13.7	Stabilitätskriterien und ihre klimatologischen Konsequenzen für turbulenten Austausch und konvektive Prozesse	195
13.8	Das Prinzip von Stau und Föhn	198
13.9	Vertikalbewegungen im Bereich von Fronten	201
14	Wolken und Niederschlag	204
14.1	Kondensation und Sublimation in der Atmosphäre	204
14.2	Genetische Wolkentypen und die Grundregeln ihrer regionalen Verteilung	212
14.3	Niederschlagsbildung und Niederschlagsarten	223
14.4	Niederschlagsmessung	227
14.5	Grundregeln der regionalen Verteilung der Niederschläge	228
15	Makroklima: Die Allgemeine Zirkulation der Atmosphäre und die klimatische Gliederung der Erde	237
15.1	Die Dynamik der planetarischen Höhenwestwindzone und ihre Konsequenzen	237
15.2	Die planetarischen Luftdruckgürtel im Meeresniveau und ihre tellurische Aufgliederung	246
15.3	Der tropische Zirkulationsmechanismus und seine klimatischen Folgen	251
15.4	Die Zirkulation in den unteren Schichten der außertropischen Atmosphäre	272
15.5	Die Glieder der Allgemeinen Zirkulation im Satellitenbild	279
15.6	Zusammenfassender Überblick mit schematischer Gliederung der Klimate der Erde	282
16	Mesoklima: Stadt- und Geländeklima	286
16.1	Stadtklima	286
16.2	Luftqualität	290
16.3	Geländeklima	292
17	Atmosphärische Gefahren	296
17.1	Starkregen, Gewitter und Hagelstürme	297
17.2	Tornados	298

17.3 Herbst- und Winterstürme in Europa	299
17.4 Dauerregen und Überschwemmungen in Mitteleuropa	301
17.5 Blizzards in Nordamerika	302
17.6 Schadfröste	303
17.7 Hitzewellen	303
17.8 Tropische Wirbelstürme	305
17.9 El Niño–Southern Oscillation und der Indian Ocean Dipole	308
17.10 Weltkarte atmosphärischer Gefahren	309
18 Klima im Wandel – Rückblicke, Einblicke und Ausblicke	311
18.1 Die natürliche Klimavariabilität und das Klima der Vergangenheit	311
18.2 Die Entdeckung des Treibhauseffekts	317
18.3 Der gefährliche anthropogene Klimawandel der Gegenwart	318
18.4 Aktuelle und künftige Klimafolgen	323
18.5 Klimapolitik: Strategien zur Emissionsvermeidung und Anpassung ...	333
Literaturverzeichnis	344
Verzeichnis der Internetadressen	357
Maßeinheiten und Umrechnungsformeln	358
Sachregister	361

1 Das Klima mit seinen Raum- und Zeitdimensionen

Klimatologie ist die Wissenschaft vom Klima. Die Beschäftigung mit dem Klima ist so alt wie die Menschheit selbst. Von den sintflutartigen Niederschlägen der Genesis, über die Stürme der Odyssee und den Turm der Winde im klassischen Athen – das griechische κλίω (= klino) bedeutet „ich neige“ und bezieht sich auf die unterschiedlichen Winkel, unter denen die Sonnenstrahlen an verschiedenen Orten im Laufe des Jahres die Erde erreichen – bis zum heutigen „climate change“ hat sich der Mensch immer mit den charakteristischen Qualitäten der Atmosphäre über einem Ort oder einer Region auseinandergesetzt. In den vergangenen 2 Jahrhunderten sind so eine ganze Reihe von Klimadefinitionen geprägt worden, die diesen Sachverhalt aus verschiedenen Richtungen beleuchten:

Alexander von Humboldt (1817): Der Ausdruck Klima bezeichnet in seinem allgemeinen Sinne alle Veränderungen in der Atmosphäre, die unsere Organe merklich affizieren ...

Julius von Hann (1883): Unter Klima verstehen wir die Gesamtheit der meteorologischen Erscheinungen, die den mittleren Zustand der Atmosphäre an irgend einer Stelle der Erdoberfläche kennzeichnen. Was wir Witterung nennen, ist nur eine Phase, ein einzelner Akt aus der Aufeinanderfolge der Erscheinungen, derer voller, Jahr für Jahr mehr oder minder gleichartiger Ablauf das Klima eines Ortes bildet. Das Klima ist die Gesamtheit der „Witterungen“ eines längeren oder kürzeren Zeitabschnittes, wie sie durchschnittlich zu dieser Zeit des Jahres einzutreten pflegen.

Wladimir Köppen (1923): Unter Klima verstehen wir den mittleren Zustand und gewöhnlichen Verlauf der Witterung an einem gegebenen Ort. Eine doppelte Abstraktion ist es, die uns zum Begriff des Klimas führt, nämlich eine Zusammenfassung einerseits der wechselnden Witterungen, andererseits der einzelnen meteorologischen Elemente zu einem Gesamtbilde.

B. P. Alissow, O. A. Drozdow und E. S. Rubinstein (1956): Unter dem Klima eines gegebenen Ortes versteht man den langjährigen Durchschnitt seiner charakteristischen Witterungen, der durch die Sonneneinstrahlung, die Eigenart der Unterlage und die damit verknüpfte atmosphärische Zirkulation verursacht wird.

Rudolf Geiger (1961): Der Begriff „Klima“ ist abstrakt ... Denn das Klima umfasst die Gesamtheit aller meteorologischen Einzelvorgänge, die wir Wettervorgänge nennen, an einem gegebenen Ort, also die durchschnittlichen Zustände und den regelmäßigen Ablauf des Wetters einschließlich der wiederholt beobachteten Sondererscheinungen, wie etwa Tornados, Staubstürme oder Spätfröste. Man kann also das Klima nicht verstehen, wenn man mit den Wettererscheinungen nicht vertraut ist.

K. Schneider-Carius (1961): Das Klima ist die für einen Ort geltende Zusammenfassung der meteorologischen Zustände und Vorgänge während einer Zeit, die hinreichend lang sein muß, um alle für diesen Ort bezeichnenden atmosphärischen Vorkommnisse in charakteristischer Häufigkeitsverteilung zu enthalten.

Joachim Blüthgen (1966): Das geographische Klima ist die für einen Ort, eine Landschaft oder einen größeren Raum typische Zusammenfassung der erdnahen und die Erdoberfläche beeinflussenden atmosphärischen Zustände und Witterungsvorgänge während eines längeren Zeitraumes in charakteristischer Verteilung der häufigsten, der mittleren und der extremen Werte.

World Meteorological Organization (1979): Klima ist die Synthese des Wetters über einen Zeitraum, der lang genug ist, um statistische Eigenschaften bestimmen zu können.

W. L. Gates (1979): Klima wird in drei verschiedenen Kategorien definiert, nämlich Klimasystem, Klimazustand und Klimaänderung. Das Klimasystem besteht aus Atmosphäre, Hydrosphäre, Kryosphäre, Lithosphäre und Biosphäre. Ein Klimazustand wird durch die vollständige Beschreibung des statistischen Zustandes des internen Klimasystems beschrieben. Eine Klimaänderung ist die Differenz zweier Klimazustände der gleichen Art.

Alexander von Humboldt setzt in einer erstaunlich aktuellen Definition den Mensch in den Mittelpunkt. Julius von Hann definiert Klima als den mittleren Zustand der Atmosphäre an irgendeiner Stelle der Erdoberfläche und trennt den in der deutschen Sprache besonderen Begriff der Witterung vom Klima ab. Wladimir Köppen hebt hervor, dass Klima ein abstrakter Begriff ist, der nicht direkt messtechnisch erfasst und beobachtet werden kann, sondern dass einzelne Klimaelemente erst zu einem Gesamtbild zusammengefasst werden müssen. Alissow, Drozdow & Rubinstein verweisen auf die hervorragende Bedeutung der Strahlungsprozesse und den dynamischen Aspekt des Klimas, der in der atmosphärischen Zirkulation deutlich wird. Rudolf Geiger betont, dass man das Klima nicht verstehen kann, wenn man mit den Wettererscheinungen nicht vertraut ist. Bei Schneider-Carius wird erstmals deutlich, dass Klimatologie eine statistische Komponente beinhaltet, mit der die Messdaten zu bearbeiten sind. Der Geograph Joachim Blüthgen akzentuiert vor allem die Raumaspekte des Klimas und merkt an, dass nicht nur Mittel-, sondern auch Extremwerte das Klima eines Ortes prägen. Die statistische Betrachtungsweise hat sich auch die Weltorganisation für Meteorologie (WMO) auf der 1. Weltklimakonferenz im Jahre 1979 zu eigen gemacht, die auf die Überlegungen von Gates (1979) zurückgeht. Dieser Klimamodellierer definiert Klima in drei verschiedenen Kategorien, nämlich als System, Zustand und Änderung. Zum *Klimasystem* zählen danach die *Atmosphäre* (Gashülle des Planeten inklusive der Aerosole), *Hydrosphäre* (flüssiges Wasser an und nahe der Oberfläche), *Kryosphäre* (Schnee und Eis), *Geosphäre* (mit Gestein und Boden) sowie *Biosphäre* mit Pflanzen- und Tierwelt und dem Menschen (Fig. 1.1). Das Klimasystem unseres Planeten beschränkt sich also nicht nur auf die Atmosphäre, sondern bezieht alle, für die Genese des Klimas wichtigen Sphären oder Teilsysteme mit ein.

durch den Pflanzenbau modifiziert), kann man seinen Handlungsbereich auch als Anthroposphäre definieren. Die verschiedenen Komponenten der Subsphären haben charakteristische und sehr unterschiedliche Umwälzzeiten, die von wenigen Tagen bis Millionen von Jahren reichen (Tab. 1.1).

Tab. 1.1 Komponenten des Klimasystems und ihre charakteristischen Zeiten. Quelle: Hupfer 1996, verändert

Komponente	Grenzfläche zwischen Erdoberfläche und Atmosphäre		Charakteristische (Umwälz-) Zeiten
	10 ⁶ km ²	%	
<i>Atmosphäre</i> Stratosphäre Troposphäre	510	100	1 – 3 Jahre 5 – 10 Tage
<i>Hydrosphäre</i> Flüsse, Seen Grundwasser Ozean. Deckschicht Tiefsee	361	70,8	Tage – Monate 10 – 10 000 Jahre 100 Tage 100 – 1 000 Jahre
<i>Geosphäre</i> feste Erde, Landflächen Pedosphäre Lithosphäre	149	29,2	Tage – Monate – Jahrhunderte 100 000 – Mill. Jahre
<i>Kryosphäre</i> Schneedecke Landeis Gebirgsgletscher Eisschilde Meer- u. Packeis	14,5 26	2,8 5,1	Stunden – Tage 1 – 100 Jahre 1 000 – 10 000 Jahre Monate – Jahre
<i>Biosphäre</i> lebende Biota tote Biomasse	103	20,2	Tage – Jahre 1 – 100 Jahre

Dieses einführende Buch konzentriert sich auf die Prozesse, die in der Atmosphäre ablaufen. Als *Klima* wird der Komplex der charakteristischen Qualitäten des Luft-raumes über einer Erdstelle definiert, der durch ihre ganz spezifische Lage auf der Erdoberfläche bestimmt ist. Als Lagekategorien sind dabei die Lage im System der Breitenkreise (*solare Lage*), die *meteorologische Lage* im Einflussbereich der All-gemeinen Zirkulation der Atmosphäre und die *geographische oder tellurische Lage* im Verbreitungsgefüge der Land- und Wasserflächen inklusive der Reliefgliederung und dem Bedeckungszustand der Erdoberfläche zu unterscheiden. Unter *Klimaelementen* versteht man diejenigen Messgrößen, die durch ihr Zusammenwirken das Klima kennzeichnen. Zu den wichtigsten zählen die Strahlung, bei der die von der

Sonne ausgehende kurzwellige von der langwelligen, terrestrischen Strahlung zu unterscheiden ist, die Temperatur, Luftfeuchtigkeit sowie Niederschlag und Verdunstung, Luftdruck und Wind. Hinzu treten noch eine ganze Reihe weiterer Elemente, etwa die Sonnenscheindauer oder der Bedeckungsgrad mit Wolken.

Von den Klimaelementen zu unterscheiden sind die aus geographischer Sicht relevanten *Klimafaktoren*, also diejenigen Größen, die auf das Klima einwirken und es beeinflussen. Dazu zählen die geographische Breite, die Höhenlage (sowohl über dem Meeresspiegel als auch beispielsweise über einem lokalen Talboden), die großräumige Verteilung von Land und Meer, die kleinräumig wirksame Exposition (Ausrichtung) und Inklinatation (Neigung) eines Hanges sowie die Bedeckung der Unterlage und ihre Eigenschaften, z. B. bezüglich der Wärmeleitung.

Klimatologie ist eine Raumwissenschaft, so dass es notwendig ist, verschiedene räumliche Dimensionen auseinander zu halten. International am meisten verbreitet in der horizontalen Skala ist die Klassifikation von Orlanski (1975) in *Mikro*-, *Meso*- und *Makroklima* (Fig. 1.2). Weitere Differenzierungen bezeichnet dieser Autor durch griechische Buchstaben.

In der Dimension der Mesoklimatologie gibt es aus geographischer Sicht allerdings eine Reihe zusätzlicher Begriffe, wie etwa Stadt- und Geländeklima oder Regional-klima, die den spezifischen Raumbezug besonders betonen und deren Gebrauch Sinn macht. Die verschiedenen Raumskalen sind vielfältig miteinander verknüpft. So haben Veränderungen des globalen Klimas Auswirkungen in der regionalen Dimension, die auf verschiedenen Kontinenten durchaus anders ausfallen können. Und in der lokalen Dimension des Stadtklimas können sich Veränderungen, die durch die Bautätigkeit hervorgerufen werden, mit solchen, die dem globalen Klimawandel zugeschrieben werden, superponieren. Neben der horizontalen verfügt das Klima auch über eine *vertikale* und eine *zeitliche Dimension*. Atmosphärische Phänomene, die innerhalb weniger Sekunden, Minuten oder Tage ablaufen, werden als meteorologische

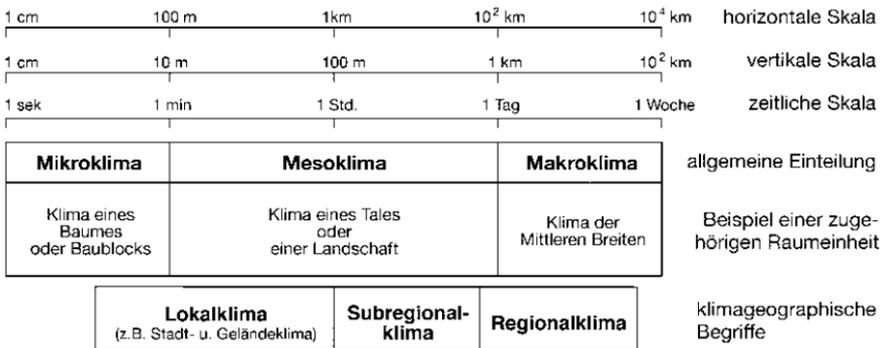


Fig. 1.2 Horizontale, vertikale und zeitliche Skalen in der Klimatologie (verändert nach Orlanski 1975, Wanner 1986 und Bendix 2004)

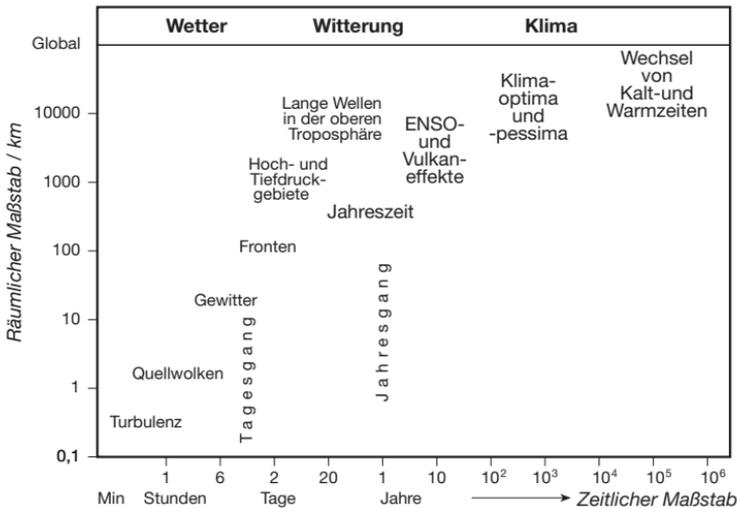
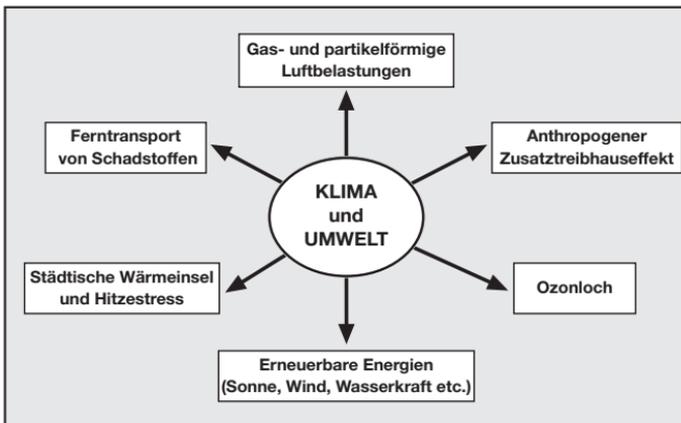
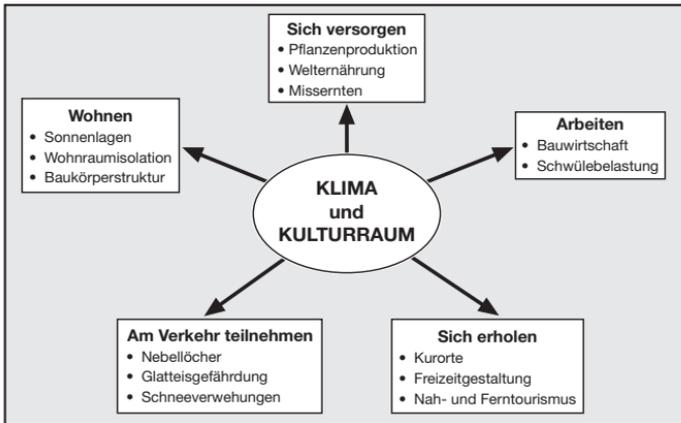
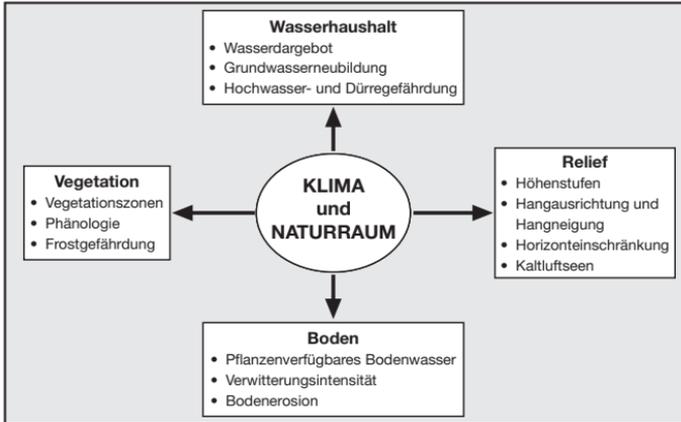


Fig. 1.3 Raum- und Zeitdimensionen atmosphärischer Phänomene (verändert nach Hupfer 1996)

Phänomene bezeichnet und dem *Wetter* zugeordnet, von denen sich das *Klima* etwa ab dem Jahreszeitraum unterscheidet. Dazwischen geschaltet ist in der deutschen Sprache noch der Begriff der *Witterung*, mit der ein einheitliches Wettergeschehen während weniger Wochen, wie etwa die Witterungssingularitäten des Altweibersommers oder der Schafskälte, bezeichnet wird. Der Begriff des Klimas umfasst also eine Zeitdimension von wenigen Jahren (Mittelwerte und andere statistische Größen werden nach der WMO auf der Basis einer mindestens dreißigjährigen Messreihe gebildet) bis Jahrmilliarden! In Fig. 1.3 sind Beispiele für meteorologische und klimatologische Phänomene in ihrem raumzeitlichen Auftreten zusammengestellt.

Bis vor wenigen Jahrzehnten fand klimatologische Forschung und Lehre in Spezialwissenschaften wie Meteorologie, Geographie, Geophysik oder Forst- und Agrarwissenschaften statt. Seit aber deutlich geworden ist, dass der Mensch vielfältig in das Klimasystem eingreift und die Zusammensetzung der Atmosphäre verändert, ist die Klimatologie ein *interdisziplinäres Fachgebiet* geworden, an dem u. a. auch Geologen (Paläoklima), Historiker (Klimageschichte), Politologen (Klimapolitik), Wirtschaftswissenschaftler, Biologen, Atmosphärenchemiker, Mediziner, Glaziologen, Ozeanographen und andere FachwissenschaftlerInnen mitwirken. Der Blick ist dabei nicht nur auf die in der Gegenwart ablaufenden, klimarelevanten Prozesse in den verschiedenen Teilsystemen gerichtet, sondern auch auf die Vergangenheit des



Klimas und nicht zuletzt seine Zukunft; denn die komplexe Größe „Klima“ mit ihren Raum- und Zeitdimensionen ist sowohl vielfach mit Prozessen des Naturraums verknüpft, spielt aber auch bei den menschlichen Grunddaseinsfunktionen eine wichtige Rolle und ist schließlich ein entscheidender Umweltfaktor (Fig. 1.4).

2 Erddimensionen und Beleuchtungsklimazonen

2.1 Erddimensionen

Im klimatologischen Ableitungszusammenhang kann die Erde mit hinlänglicher Genauigkeit als Kugel mit einem mittleren Radius von $r_m = 6\,371,23$ km angesehen werden. In Wirklichkeit ist sie ein schwach abgeplattetes Rotationsellipsoid, bei dem der Radius längs der Erdachse (polarer Radius) nur $r_p = 6\,356,80$ km, längs der Äquatorebene (äquatorialer Radius) aber $r_{\ddot{a}} = 6\,378,18$ km misst.

Nach den Gesetzen der Geometrie lassen sich berechnen:

der Äquatorumfang zu $U_{\ddot{a}} = 2 r_{\ddot{a}} \pi \approx 2 \cdot 6\,378,18 \text{ km} \cdot 3,1415 \approx 40\,075 \text{ km}$,

die Oberfläche der Erdkugel zu

$F_{\text{Erde}} = 4 r_m^2 \pi \approx 4 \cdot 6\,371,23 \text{ km} \cdot 6\,371,23 \text{ km} \cdot 3,1415 \approx 510,1 \text{ Mio. km}^2$.

2.2 Himmelsmechanische Tatsachen

Sowohl die Jahreszeiten als auch die strahlungsklimatische Großgliederung der Erde in Tropen, Mittelbreiten und Polarkalotten haben wie viele davon ableitbare klimatologische Phänomene ihre Ursache in drei (miteinander verbundenen) himmelsmechanischen Tatsachen (s. Fig. 2.1):

1. in der *Erdrevolution*, d. h. im Umlauf der Erde um die Sonne (Nikolaus Kopernikus 1473–1543),
2. in der sog. *Schiefe der Ekliptik*, d. h. dem Faktum, dass die Erdachse nicht senkrecht auf der Ekliptik steht, sondern mit deren Flächennormalen einen Winkel von ungefähr $23\frac{1}{2}^\circ$ bildet, also schief auf der Ekliptik steht, und dass
3. diese Schiefe nur so kleinen periodischen Schwankungen unterliegt, dass sie aktual-klimatologisch ohne Konsequenzen sind. In erdgeschichtlichen Zeiträumen hingegen sind diese Schwankungen aber relevant und einer der Auslöser für natürliche Klimaschwankungen.

zu 1. Die Umlaufzeit um die Sonne beträgt genau 365 Tage, 5 Stunden, 48 Minuten und 46 Sekunden. Bei einem Jahr von 365 Tagen muss deshalb alle 4 Jahre ein Schaltjahr mit 366 Tagen eingefügt werden, wobei zu den Jahrhundertwenden der Schalttag in der Regel ausfällt. Wie alle Planetenbahnen ist auch die der Erde eine *Ellipse*, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht (1. Keplersches Gesetz; Johannes Kepler 1571–1630). Die Abweichung von einer idealen Kreisbahn, d. h. die *Exzentrizität* der Erdbahn, ist aber nur sehr gering. Ihre langfristige Variation spielt bei den natürlichen Klimaschwankungen aber eine Rolle. Auf der großen Achse (= Apisidienlinie) der Ellipse liegen sowohl der Ort größter Sonnennähe (= *Perihel* der Erd-

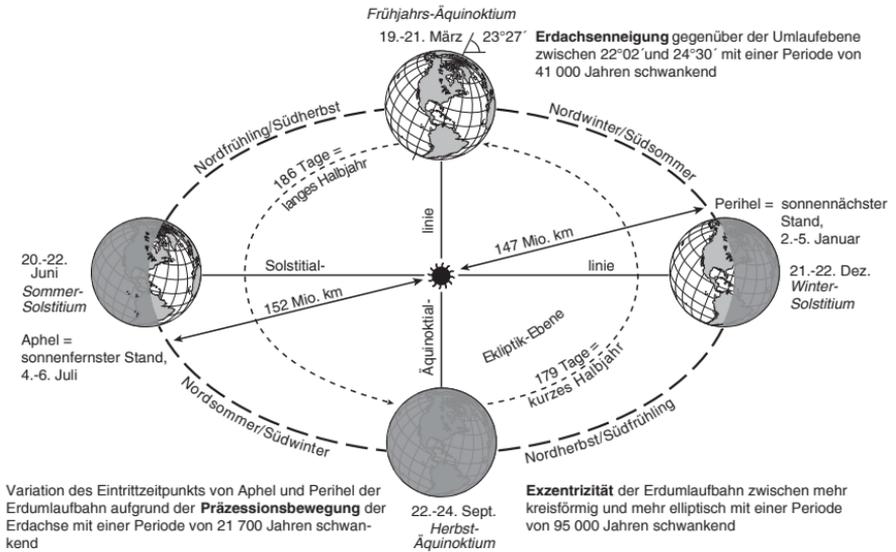


Fig. 2.1 Erdbahn um die Sonne (Erdrevolution) und die Entstehung der Jahreszeiten.

bahn $147 \cdot 10^6$ km) als auch der Ort größter Sonnenferne (= *Aphel* $152 \cdot 10^6$ km vom Mittelpunkt der Sonne entfernt). Den Punkt größter Sonnennähe passiert die Erde in der Gegenwart am 2.–5. Januar, den Punkt größter Sonnenferne am 4.–6. Juli. Im Laufe von 21 700 Jahren verschiebt sich der Termin um 365 Tage. Diese Verschiebung der Apsidenlinie unter der Einwirkung der anderen Planeten (*Präzession der Erdachse*) ist ebenfalls für Klimaschwankungen im Zeitraum von Zehn- bis Hunderttausenden von Jahren relevant. Als mittlere Geschwindigkeit der Erde errechnet sich ungefähr 30 km s^{-1} , jedoch ist die Bewegung nicht konstant. Das bedeutet, dass sich die Erde im Perihel schneller, im Aphel langsamer bewegt (größter Unterschied 1 km s^{-1}) und die astronomischen Halbjahre dadurch ungleich lang sind.

zu 2. Die Ebene, die durch Erdbahn und Mittelpunkt der Sonne gedacht wird, heißt *Ekliptik*. Da durch die Erdrotation (wie bei jedem Massenkreisel) die Erdachse in ihrer Richtung im Raum fixiert ist, vollzieht sich die Erdrevolution so, dass die Erdachse in jedem Punkt der Umlaufbahn zu sich selbst parallel bleibt und immer mit einer Flächennormalen auf der Ekliptikebene einen Winkel von rund $23\frac{1}{2}^\circ$ bei nur sehr geringfügigen säkularen Schwankungen behält. Die Äquatorebene der Erde ist gegenüber der Ekliptikebene deshalb auch um rund $23\frac{1}{2}^\circ$ geneigt (= *Schiefe der Ekliptik*). Auch dieser Erdbahnparameter variiert langfristig zwischen $22^\circ 02'$ und $24^\circ 30'$. Verfolgt man die Erde mit der zu sich selbst parallel bleibenden Rotationsachse auf ihrer Bahn, so gibt es auf dieser zwei ausgezeichnete Punkte, an denen ein gedachter Leitstrahl von der Sonne her senkrecht auf die Erdachse auftrifft und damit gleichzeitig der Grenzkreis zwischen beleuchteter und unbeleuchteter Hälfte der

Erdkugel (*Beleuchtungskreis*) mit der Erdachse in einer Ebene liegt und durch die Pole verläuft. An den vorauf bezeichneten Punkten der jährlichen Umlaufbahn werden *alle* Breitenkreise von der Beleuchtungsgrenze halbiert, was bedeutet, dass während einer vollen Erdumdrehung innerhalb von 86 164 Sekunden (\approx 24 Stunden) alle Orte auf der Erde 12 Stunden Tag und 12 Stunden Nacht haben. Die ausgezeichneten Punkte auf der Erdbahn sind die der *Tag- und Nachtgleiche* (*Äquinoktialpunkte* oder *Äquinoktien*). Davon fällt der *Frühlingspunkt* auf den 19.–21. März, der *Herbstpunkt* auf den 22.–24. September. Aufgrund der ellipsen- und nicht kreisförmigen Erdbahn ist somit das Sommerhalbjahr der Südhalbkugel (23. 9. bis 21. 3.) mit 179 Tagen (genau 178 Tage 19 h) kürzer als das der Nordhalbkugel mit 186 Tagen (und 11 h). Die gedachte Verbindungslinie von Frühlings- und Herbstpunkt auf der Ekliptik heißt *Äquinoktiallinie*. Die *Solstitiallinie* dagegen verbindet jene Punkte der Erdbahn, an denen die Erdachse gegenüber dem Leitstrahl von der Sonne her die größtmögliche Neigung von $23\frac{1}{2}^\circ$ aufweist und dadurch alle Orte auf der Erde abseits des Äquators je nach Halbkugel den längsten bzw. den kürzesten Tag des Jahres haben. Diese Punkte werden von der Erde am 20.–21. Juni und 21. oder 22. Dezember passiert.

zu 3. Die langfristigen Veränderungen der Orbitalparameter wurden erstmals in den 1920er Jahren von dem Belgrader Mathematiker und Astronomen Milutin Milankovitch (1879–1958) als Auslöser von Warm- und Kaltzeiten im Rhythmus von etwa 100 000 Jahren postuliert und gelten zwischenzeitlich als bewiesen (Milankovitch 1920, 1930; Berger 1977; 1981; 1996). Nähert sich z.B. die Erdumlaufbahn um die Sonne ihrem maximalen Ellipsenstadium (maximale Exzentrizität), so treten im Jahresverlauf größere Unterschiede in der Bestrahlungsintensität je nach Sonnennähe bzw. -ferne auf. Eine starke Neigung der Erdachse (große Obliquität) verstärkt die Jahreszeiten, eine geringe schwächt sie ab. Und die Präzession führt dazu, dass derzeit der sonnennächste Stand der Erde (Perihel) in den Südsommer fällt, so dass die erhöhte Strahlungsintensität wegen der auf der Südhemisphäre nur geringen Landmasse bzw. der mit Schnee bedeckten Antarktis ohne Auswirkung bleibt. Vor 11 000 Jahren war der Perihelstand dagegen im Nordsommer und die damit verbundene stärkere Einstrahlung auf der Nordhemisphäre einer der wesentlichen Gründe für das Abtauen der großen Inlandeisdecke und die Beendigung der letzten Kaltzeit (Pleistozän) bzw. initiierte die aktuelle Warmzeit des Holozäns (Fig. 2.2 und Kap. 18.1).

2.3 Jahreszeiten

In der Fig. 2.3 ist auf der linken Seite die Situation für den 21. Dezember skizziert. Die beleuchteten Bogenstücke (Tagbögen) der Breitenkreise sind auf der Südhalbkugel größer als die unbeleuchteten Nachtbögen. Der südliche Polarkreis ($66\frac{1}{2}^\circ$) liegt in voller Länge in der Beleuchtungszone (24 Stunden Tag). 12 Stunden nach ihrem Höchststand berührt die Sonne von oben her gerade den Horizont („Mitternachtssonne“). In Breiten weiter zum Pol bleibt die Sonne zu diesem Zeitpunkt noch beträchtlich über dem Horizont, am Pol selbst um $23\frac{1}{2}^\circ$. Am Äquator herrscht auch zu dieser Solstitialzeit (wie zu den Äquinoktien) und damit *ganzjährig Tag- und*

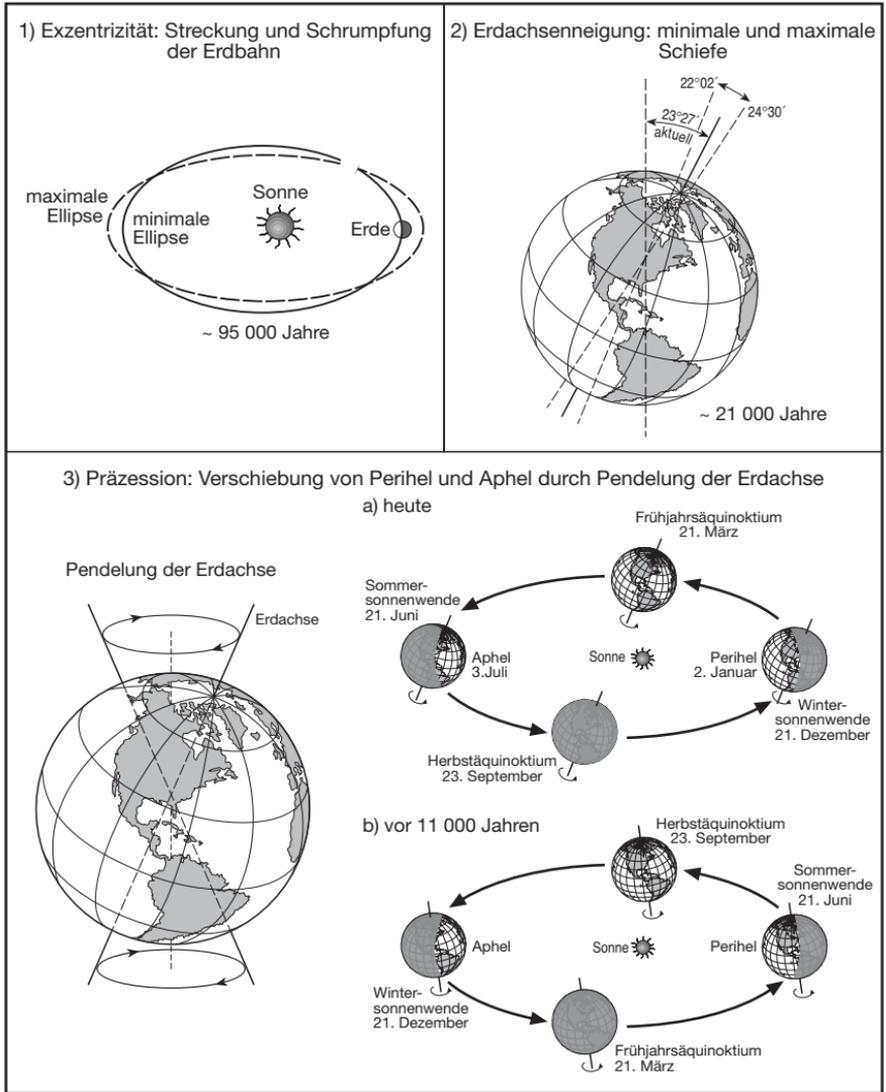


Fig. 2.2 Änderung der Orbitalparameter: a) Exzentrizität, b) Obliquität, c) Präzession sowie daraus folgend die unterschiedliche jahreszeitliche Position der Erde im Perihel bzw. Aphel während des Präzessionszeitraumes von ca. 22 000 Jahren. Quelle: Verschiedene Quellen u.a. Joussaume 1999

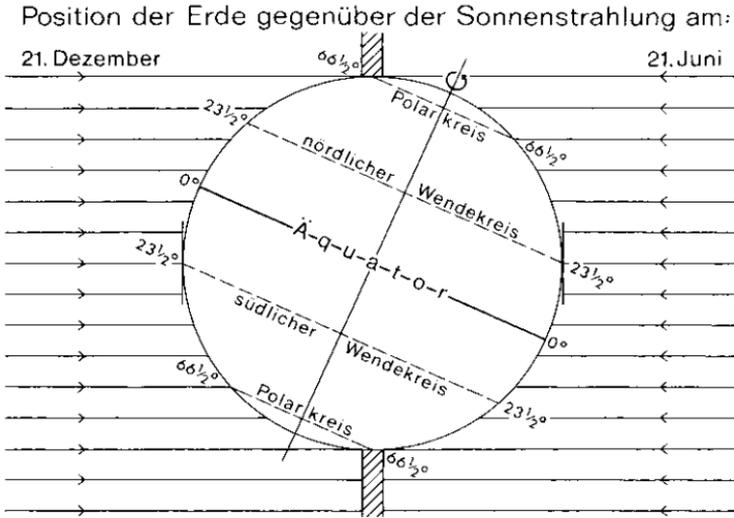


Fig. 2.3 Position der Erde gegenüber der Sonnenstrahlung am 21. XII. und 21. VI. Tropen, Mittelbreiten, Polargebiete

Nachtgleiche. Auf der Nordhalbkugel ist am 21. Dezember der Tagbogen kürzer als der Nachtbogen. Der nördliche Polarkreis liegt auf seiner ganzen Länge außerhalb der Beleuchtungsgrenzen; zum Wintersolstitium herrscht dort 24 Stunden lang Nacht. Zum Mittagstermin berührt die Sonne gerade von unten her den Horizont.

Die Beleuchtungssituation ist am 21. Dezember eine Grenz- und Umkehrsituation im jahresperiodischen Gang (Sonnenwende: ab 22. Dezember werden auf der Südhalbkugel die Beleuchtungszeiten kürzer, auf der Nordhalbkugel länger). *Polar-kreise* ($66\frac{1}{2}^\circ$ N und S) sind jene singulären Breitenkreise, auf denen an jeweils einem Tag im Jahr die Sonne 24 Stunden über dem Horizont bleibt und damit rings um den Horizont wandert (*Sommersolstitium der jeweiligen Halbkugel*) bzw. 24 Stunden lang nicht aufgeht (*Wintersolstitium*). Die *Polargebiete* *polwärts der Polarkreise* zeichnen sich dadurch aus, dass mit wachsender Annäherung an die betreffenden Pole die Zeiträume ununterbrochener Helligkeit bzw. permanenter Dunkelheit jeweils auf mehrere Tage, Wochen oder gar Monate (am Pol sind es jeweils 6 Monate) zunehmen und damit der abseits der Polargebiete notorische Wechsel von Tag und Nacht im 24-Stunden-Rhythmus für bestimmte Perioden im Jahr unterbrochen und durch den sog. *Polartag* bzw. die *Polarnacht* ersetzt wird. Die Fläche der beiden Polarkappen beträgt nur je 4,14 % der Erdoberfläche, zusammen 8,29 %. An derselben Fig. 2.3 lässt sich für die breitenabhängige Differenzierung der Sonnenhöhen über dem Horizont zum wahren Mittagstermin (Tageshöchststand der Sonne) Folgendes ablesen: Am 21. Dezember steht die Sonne

um 12 Uhr wahre Ortszeit über den Orten auf dem Breitenkreis $23\frac{1}{2}^\circ$ S im Zenit (90° über dem Horizont). Für den 21. Juni gilt dasselbe für den Breitenkreis $23\frac{1}{2}^\circ$ Nord. $23\frac{1}{2}^\circ$ N und S sind also jene Breitenkreise, an denen an einem wahren Mittag im Jahr die Sonne senkrecht über dem Horizont, im Zenit, steht. Es sind jene ausgezeichneten Parallelkreise, an welchen der Senkrechtstand der Sonne auf seiner jahresperiodischen Wanderung in der Wanderungsrichtung umkehrt, sich umwendet (*nördlicher und südlicher Wendekreis*). (Am Umkehrpunkt tritt ein scheinbarer Stillstand ein, daher „Sonnenstillstand“ = *Solstitium*).

An dem gleichen 21. Dezember steht an den Orten am Äquator mittags die Sonne nur $90 - 23\frac{1}{2} = 66\frac{1}{2}^\circ$ über dem Horizont, an solchen am nördlichen Wendekreis erreicht sie mit $90 - 23\frac{1}{2} - 23\frac{1}{2} = 43^\circ$. Sie hat damit für die ganze Zone zwischen Äquator und nördlichem Wendekreis den niedrigsten Stand im ganzen Jahr. Bis zum 21. Juni kehren sich dann die Verhältnisse um. Die *astronomischen Tropen* als die Zone zwischen dem nördlichen und südlichen Wendekreis sind also strahlungsklimatisch dadurch definiert, dass in ihnen die Sonne ein- oder zweimal im Jahr mittags senkrecht steht und dass die Mittagshöhe nie kleiner als 43° wird. Der Tropenring nimmt mit 39,87 % einen sehr großen Anteil der Erdoberfläche ein. Klimatologisch bedeutungsvoll ist noch die Differenzierung in *äußere* und *innere Tropen*. In den letzteren nahe dem Äquator wirken nämlich die Tatsachen, dass der Zenitstand der Sonne in zwei deutlich voneinander getrennten Perioden jeweils um den 21. März und 23. September auftritt, in den anderen Zeiten aber die Mittagshöhe immer nahe $66\frac{1}{2}^\circ$ bleibt und dass außerdem die Tageslänge im ganzen Jahr fast gleichmäßig 12 Stunden beträgt, dahin zusammen, dass *das ganze Jahr über sehr gleichmäßige Beleuchtungs- und Strahlungsbedingungen* resultieren. In den äußeren Tropen nahe den Wendekreisen ist das schon etwas anders: erstens folgt der zweimalige Höchststand der Sonne (auf dem Hin- und Rückweg) zeitlich relativ schnell aufeinander, zweitens ist zum Unterschied von der Höchststandperiode ein halbes Jahr später die Mittagshöhe der Sonne mit nahe 43° doch schon merklich tiefer, drittens sind auch die Tageslängen in den beiden Jahresabschnitten schon um ca. 3 Stunden verschieden. Alles das wirkt zusammen, dass in den äußeren Tropen bereits deutliche jahreszeitliche Unterschiede von Beleuchtungs- und Strahlungsbedingungen auftreten, die noch wesentlich wirksamere klimatologische Jahreszeitenphänomene zur Folge haben (s. Kap. über die Allgemeine Zirkulation). Zwischen Wende- und Polarkreisen liegen die *strahlungsklimatischen Mittelbreiten*, in denen einerseits zwar der Wechsel von Tag und Nacht im Laufe des Jahres nicht durchbrochen wird, andererseits aber der Unterschied von deren jeweiliger Länge einen wesentlichen Klimafaktor darstellt, der sich zusammen mit den Schwankungen der Sonnenhöhe entscheidend in der Ausbildung der besonders für die höheren Mittelbreiten charakteristischen *vier Jahreszeiten Frühling, Sommer, Herbst und Winter* auswirkt.

Im Diagramm der Fig. 2.4 lassen sich für die Zeiten des Winter- und Sommersolstitiums der jeweiligen Halbkugel (Index *w* bzw. *s*) Tageslänge (*D*) und Mittagshöhe der Sonne (*h*) für jede Breite ablesen. Besonders an den Linien für die Tageslängen im Sommer und Winter wird deutlich, dass die Mittelbreiten eine sehr uneinheitliche

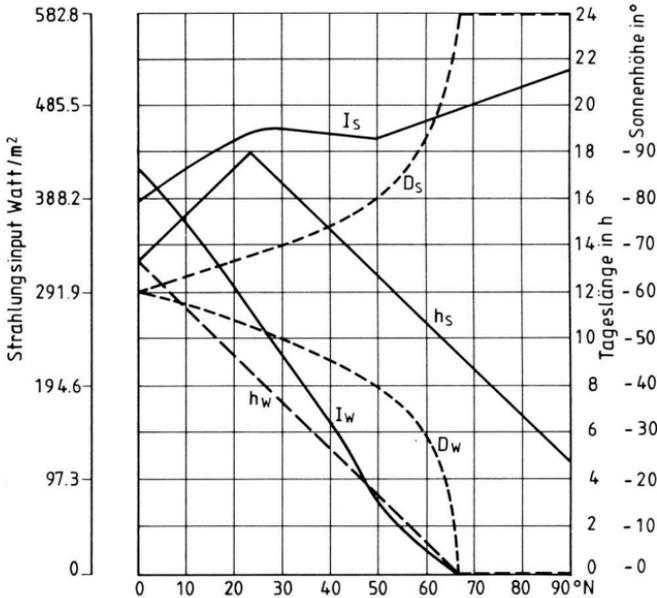


Fig. 2.4 Tageslänge, Sonnenhöhe und solare Strahlungsmenge für Sommer- und Wintersolstium in Abhängigkeit von der geographischen Breite (nach Neuberger und Cahir 1969)

Beleuchtungsklimazone darstellen. Man unterteilt sie am besten noch in niedere und hohe Mittelbreiten und setzt zweckmäßigerweise die Grenze bei 45°. Dann bleibt äquatorwärts bis zum Wendekreis eine Zone, in welcher im Sommer mittags die Sonne *sehr hoch* am Himmel steht („sehr hoch“ festgelegt als 67–90°), der Tag aber mit 15 Stunden relativ kurz bleibt. Demgegenüber reicht die Mittagssonne im Winter immer noch *mittelhoch* (23–45° über dem Horizont), und die Tage bleiben wenigstens 8½ Stunden lang. Sehr hohe Mittagssonne, früher Abend und relativ lange Nacht im Sommer, relativ lange, lichte Tage bei noch wärmerer Sonne im Winter, das sind die Charakteristika der *niedereren Mittelbreiten* oder *strahlungsklimatischen Subtropen* (2 Ringe von je 15,42 % der Erdoberfläche).

Polwärts 45° folgen strahlungsklimatisch die *hohen Mittelbreiten*. Ihre Fläche ist mit je 10,5 % der Nord- und Südhalbkugel, zusammen also 21 % der Erdoberfläche, relativ klein. Sie sind ausgezeichnet durch hohen (45–67°) Sonnenstand und polwärts rapide sich verlängernde Tage im Sommer (in Schweden geht Ende Juni die Sonne erst gegen 21 Uhr unter und um 22 Uhr ist es immer noch nicht dunkel), sowie im Winter extrem kurze Tage, an denen die Sonne immer tief bleibt, d. h. nie mehr als 23° über den Horizont kommt. Bei dieser Sonnenhöhe wirken sich besonders im Winter und in den Übergangsjahreszeiten Frühling und Herbst die geländebedingten Expositionsunterschiede extrem aus („Winter“- und „Sommerberg“, früher Früh-

ling am Südhang, Herbstsonne auf südexponierten Weinbergen). In allen anderen Strahlungsklimazonen spielt die Geländeexposition eine viel geringere Rolle. (In den Tropen und niederen Subtropen „schaut die Sonne immer über den Berg“, in den Polargebieten kommt sie bei dem langen Tagbogen „von hinten herum“.)

In Fig. 2.5 sind die scheinbaren Sonnenbahnen für ausgewählte Breitenkreise der Nordhemisphäre zusammengestellt, um die dargelegten Sachverhalte noch einmal zu verdeutlichen.

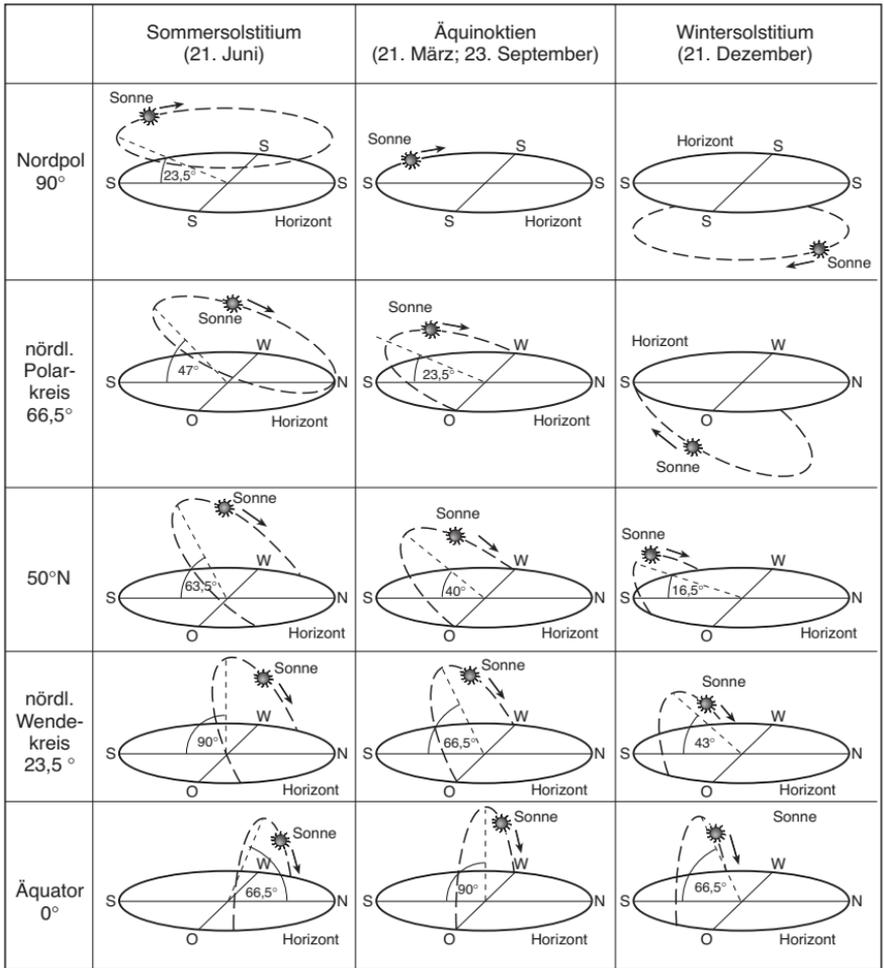


Fig. 2.5 Scheinbare Sonnenbahnen in ausgewählten Breiten der Nordhemisphäre (unter Verwendung von Goßmann 1989)

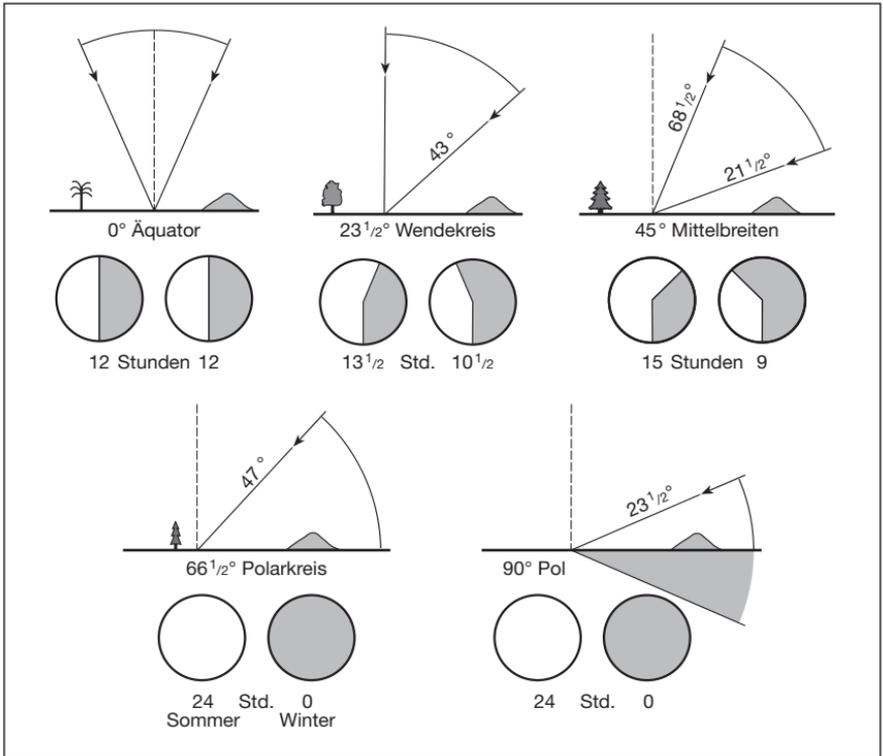


Fig. 2.6 Maximale und minimale Mittagssonnenhöhen und Tageslängen in verschiedenen geographischen Breiten. Entwurf: Weischet

Maximale und minimale Mittagssonnenhöhen und Tageslängen in 5 verschiedenen geographischen Breiten und ihre Bedeutung für Relief und Vegetation zeigt Fig. 2.6.

3 Die Sonne als Energiequelle und die Ableitung des solaren Klimas

3.1 Energiequelle und Solarkonstante

Die Quelle, aus der praktisch die gesamte Energie stammt, die den Zirkulationsmechanismus der Atmosphäre mit all seinen klimatologischen Erscheinungen in Bewegung setzt, die außerdem das ganze organische Leben auf der Erde ermöglicht und die alle Arbeit zur physikalischen und chemischen Veränderung an der festen Erdoberfläche liefert, ist die *Sonne* (Maßeinheit für Energie = Joule). Der Wärmestrom aus dem Erdinneren ist nur lokal für Heizzwecke von Bedeutung.

Die Sonne, die astronomisch zu den gelben Zwergsternen zählt, ist ein riesiger Gasball mit einem Radius von ca. 696 Tausend km, d. h. dem 109fachen des Erdradius. Gewaltige Energiemengen werden im Inneren durch Kernfusionsprozesse erzeugt. Die Sonne ist ca. 150 Mio. km von der Erde entfernt. Das System Sonne–Erde kann man sich maßstabsgerecht ($10^9 : 1$) verkleinert ungefähr so vorstellen, dass in einem Tor eines etwas vergrößerten Fußballplatzes (ca. 150 m lang) ein (Sonnen-)Ball von 1,4 m Durchmesser und im gegenüberliegenden Tor ein (Erd-)Kügelchen von nicht ganz 1,4 cm Durchmesser liegt.

Die Sonnenenergie gelangt in Form von *elektromagnetischer Strahlung* auf die Erde. Darunter versteht man einen Energiefluss in Form elektromagnetischer Wellen oder auch schneller Teilchen (*Strahlungsfluss* = Energie/Zeit = J/s = Watt). Die Gesamtenergiedichte (*Strahlungsflussdichte* = Energie/Fläche · Zeit; Einheit $\text{J/m}^2 \cdot \text{s} = \text{W/m}^2$ oder W m^{-2}) der Ausstrahlung eines physikalisch schwarzen Körpers hängt dabei von der vierten Potenz seiner Oberflächentemperatur ab. Diesen Zusammenhang verdeutlicht das *Gesetz von Stefan-Boltzmann* (nach Jozef Stefan 1835–1893 und Ludwig Eduard Boltzmann 1844–1906):

$$S = \sigma \cdot T^4$$

$$S = \text{Gesamtenergiedichte (W m}^{-2}\text{)}$$

$$T = \text{Absolute Oberflächentemperatur eines physikalisch schwarzen Strahlers in Kelvin (K)}$$

$$\sigma = 5,67051 \cdot 10^{-8} \text{ (W m}^{-2} \text{ K}^{-4}\text{)} = \text{Stefan-Boltzmann-Konstante}$$

Warme Körper strahlen also sehr viel intensiver als kalte. Für die Sonne lässt sich eine Strahlungsflussdichte von $Q_{\text{sonne}} \approx 6,3 \cdot 10^7 \text{ W m}^{-2}$ berechnen. Die effektive Oberflächentemperatur beträgt $\approx 5785 \text{ K}$. Von der kugelsymmetrisch in den Weltraum abgestrahlten Gesamtenergie trifft auf die 150 Mill. km entfernte Erde nur eine Teilmenge von rd. 2 Milliardstel. Ihre regionale und zeitliche Verteilung und Umsetzung im System Erde + Atmosphäre bildet das Fundament der klimatischen Differenzierungen.

Die Ableitung der zeitlichen und räumlichen Verteilung der zugestrahlten Energie soll zunächst unter Abstraktion der Atmosphäre (= extraterrestrisch), d. h. für die *Bedingungen des „solaren Klimas“*, erfolgen. Als relativ leicht zu veranschaulichende *Maßeinheit für die Größe der Strahlungsenergie*, die einer Flächeneinheit [cm²] pro Zeiteinheit [s, min, Tag, Monat oder Jahr] zugestrahlt wird, wurde früher das Wärmeäquivalent in kleinen Kalorien [cal] verwendet. 1 cal ist die Wärmemenge, die benötigt wird, um 1 Gramm Wasser von 14,5 auf 15,5°C (von 287,65 auf 288,65 K) zu erwärmen.

Wichtige Umrechnungsgleichungen für kalorische Werte sind (s. auch Anhang):

$$1 \text{ cal} = 4,187 \text{ Joule} = 4,187 \text{ Wattsekunden (W s)} = 1,163 \text{ Milliwattstunden (mW h)}$$

$$1 \text{ kW h} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ W s} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J} = 0,8598 \cdot 10^6 \text{ cal}$$

$$1 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1} = 697,8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} = 697,8 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Die letztgenannte Umrechnung besagt, dass, wenn einem Quadratcentimeter innerhalb einer Minute die Energie von einer Kalorie zugeführt wird, dann einem Quadratmeter in jeder Sekunde dieser Minute die Energie von 697,8 Joule zugeführt wird. Die mittlere Leistung pro Zeiteinheit (Sekunde) ist dann 697,8 Watt.

Grundgröße aller Berechnungen über die Verteilung der Sonnenstrahlung auf der Erde ist die Solarkonstante (meist I_0 für Irradiance = Bestrahlungsstärke). Es ist die Energieflussdichte der von der Sonne kommenden Strahlung, die oberhalb des Atmosphäreninflusses bei mittlerem Sonnenabstand von einer senkrecht zur Strahlung ausgerichteten Fläche empfangen wird. Die in der Literatur angegebenen Werte schwanken aufgrund von Messunsicherheiten zwischen 1360 und 1380 W m⁻² (z. B. Kraus 2001: 1373 W m⁻², Fröhlich & Lean 1998: 1366 W m⁻²). Von der Weltorganisation für Meteorologie wird genannt Solarkonstante $I_0 \approx 1365 \text{ W m}^{-2}$ ($\approx 1,96 \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \approx 33,5 \text{ kW m}^{-2} \text{ d}^{-1}$).

Die Solarkonstante ist tatsächlich sehr konstant und schwankt nur in der Größenordnung von ca. 1 W m⁻², d. h. im Promillebereich (wobei diese Variationen schon für natürliche Klimaschwankungen ausreichen bzw. bei der Berechnung anthropogener Einflüsse auf das Klima mit berücksichtigt werden müssen, s. Kap. 18). Im Perihel ist der Wert 3,4 % größer, im Aphel um 3,5 % kleiner. Die Erde empfängt die Sonnenstrahlung aber immer nur auf einer Halbkugel. Bezieht man den Strahlungsfluss deshalb auf die gesamt Erdoberfläche, so ergibt sich ein globales Mittel der extraterrestrischen Strahlungsflussdichte von $I_0/4$, da Querschnitt- zu Kugelgröße im Verhältnis 1 : 4 stehen.

Die Verteilung ist aber nicht gleichmäßig. Die zeitliche und regionale Aufteilung lässt sich für die Bedingungen des solaren Klimas nach rein mathematisch-geometrischen Rechenverfahren bestimmen.

3.2 Fakten des solaren Klimas

Solares Klima der Erde ist die (mathematisch errechenbare) im tages- und jahresperiodischen Gang der Einheitsfläche auf der Horizontebene von Orten unterschiedli-

cher geographischer Breite unter Abstraktion der Atmosphäre zur Verfügung gestellte Strahlungsenergiemenge. Da Orte gleicher geographischer Breite das gleiche solare Klima haben, können sich alle Ableitungen auf einen Meridionalschnitt über die Erdkugel beschränken. Die der Einheitsfläche zugestrahlte Energiemenge (*Strahlungsinput*) ist gleich dem Produkt aus Strahlungsmenge pro Zeiteinheit (*Strahlungintensität = Energieflussdichte*) und Strahlungsdauer.

Aus der Erfahrung (beim Sonnenbad z.B.) weiß man und aus einfachen geometrischen Betrachtungen (s. Fig. 3.1) lässt sich leicht genauer ableiten, dass sich bei gegebener Strahlungsquelle und Einstrahlungsrichtung die Energieflussdichte auf einer Fläche mit dem Einfallswinkel der Strahlen verändert. Als Grundgröße ist gegeben die Solarkonstante (I_0) definiert für senkrechten Strahlungseinfall. Die tatsächliche Exposition der Horizontebene gegenüber der einkommenden Strahlung, der Winkel, unter dem die Sonnenstrahlen auf die Horizontebene einfallen, wird durch Erdrotation und Erdrevolution bei im Raum fixierter Erdachse in periodischen Gängen bestimmt (vgl. Fig. 2.1 und 2.2 sowie Kap. 2). Von der Erde aus betrachtet erscheint die wechselnde Exposition der Horizontebene als (scheinbare) Veränderung der Sonnenhöhe h über einem (scheinbar) festliegenden Horizont.

In der Fig. 3.1 ist für einen bestimmten Sonnenstand die Situation zwischen einfallender Sonnenstrahlung und Horizontebene dargestellt. Auf die Fläche $a' \cdot b$ trifft die Strahlung senkrecht auf; durch jeden Quadratzentimeter von ihr fließt pro Minute die Strahlungsmenge der Solarkonstante I_0 . Durch die ganze Fläche fließt $I_0 \cdot a' \cdot b$. Die gleiche Menge verteilt sich auf der Horizontebene auf die größere Fläche $a \cdot b$. Danach muss die Strahlungsmenge pro cm^2 und min (die Energieflussdichte) kleiner werden. Setzt man sie mit I an, so resultiert die Gleichung $I_0 \cdot a' \cdot b = I \cdot a \cdot b$. Man kann b herauskürzen, so dass sich $I_0 \cdot a' = I \cdot a$ ergibt oder $I = I_0 \cdot a'/a$. Nach den Gesetzen der Geometrie ist $a'/a = \sin h_m$. Da die Ableitung für jeden beliebigen Winkel über dem Horizont in der gleichen Weise durchgeführt werden kann, resultiert das allgemeine Gesetz:

$$I = I_0 \cdot \sin h_m;$$

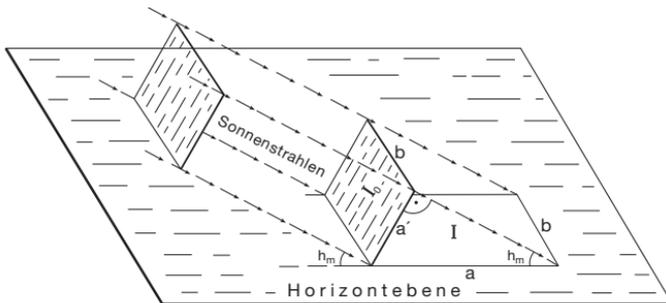


Fig. 3.1 Abhängigkeit der Strahlungsintensität vom Einfallswinkel

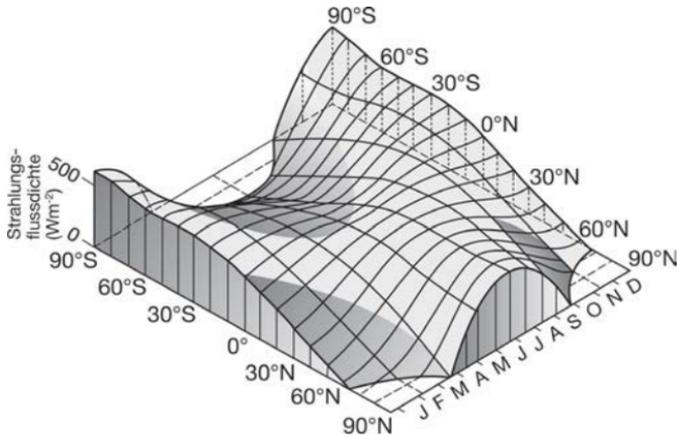


Fig. 3.3 Jahrgang der solaren Einstrahlung in verschiedenen geographischen Breiten an der Obergrenze der Atmosphäre in qualitativer Darstellung (nach W. M. Davis aus Barry & Chorley 2003)

Mit den Daten aus dieser Darstellung lassen sich die Strahlungssummen für Tage, Monate und Jahr für 50° Breite und aus entsprechenden Diagrammen für andere geographische Breiten auch die dort eingehenden Energien bestimmen. In Fig. 3.3 sind die Tagessummen der solaren Einstrahlung an der Obergrenze der Atmosphäre im Verlauf eines Jahres in verschiedenen geographischen Breiten in qualitativer Darstellung dargestellt und in der folgenden Tabelle 3.1 diejenigen für ausgewählte Tage im Jahresverlauf quantifiziert.

Tab. 3.1 Strahlungsflussdichte der Solarstrahlung in $W\ m^{-2}$ an der Obergrenze der Atmosphäre zu den Solstitien und Äquinoktien auf eine horizontale Fläche in verschiedenen geographischen Breiten. Quelle: Berger 1996

Tag	90°N	70	50	30	0	30	50	70	90°S
21. Dez.	0	0	86	227	410	507	514	526	559
21. März	0	149	280	378	436	378	280	149	0
21. Juni	524	492	482	474	384	213	80	0	0
23. Sept.	0	147	276	373	430	372	276	147	0

An diese Werte sowie die qualitative Darstellung in Fig. 3.3 lassen sich folgende Sachverhalte knüpfen:

1. Zur Zeit der Äquinoktien (21.3. und 23.9.) herrscht eine symmetrische Verteilung der Strahlungsmengen mit Maximum am Äquator (überall herrscht 12 Stunden Tag; die Energiemenge ist allein von der unterschiedlichen Sonnenhöhe abhängig).