

Christian-D. Schönwiese

Klimawandel kompakt

3. aktualisierte Auflage

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. Er 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 34 farbige Abbildungen ergänzt und veranschaulicht. Hinzu kommen eine umfangreiche Literaturliste, eine Auswahl von Internet-Links und ein ausführliches Stichwortverzeichnis.

Die vorliegende 3. Auflage wurde gründlich überarbeitet, insbesondere aber umfassend aktualisiert und auf den neuesten Stand gebracht.

www.borntraeger-cramer.de
ISBN 978-3-443-01169-7



Klimawandel kompakt

Christian-D. Schönwiese



Christian-D. Schönwiese

Klimawandel kompakt

3. aktualisierte
Auflage

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 Rhônegletschers zwischen 1860 und 1970. Mit freundlicher Genehmigung von Professor Martin Funk, ETH Zürich.

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

ISBN 978-3-443-01169-7

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

© 2020 Gebr. Borntraeger, Stuttgart, Germany

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

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

♻ Gedruckt auf alterungsbeständigem Papier nach ISO 9706-1994
Satz und Herstellung: Gebr. Borntraeger Verlagsbuchhandlung, Stuttgart
Printed in Germany by Gulde Druck, Tübingen

Vorwort zur 3. Auflage

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

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

Vorwort zur 1. Auflage

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

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

Kurz 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. 16). 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 Schmelzwasserseen 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 Wärmeübergang 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 im globalen Mittel erlaubt Abb. 17 unten. Im oberen Bildteil ist sie für die letzten Jahrtausende im nordhemisphärischen Mittel zu sehen. Dabei sind die Quellen zwar schon älter und weniger verlässlich, jedoch deckt sich die bessere zeitliche Auflösung durchaus

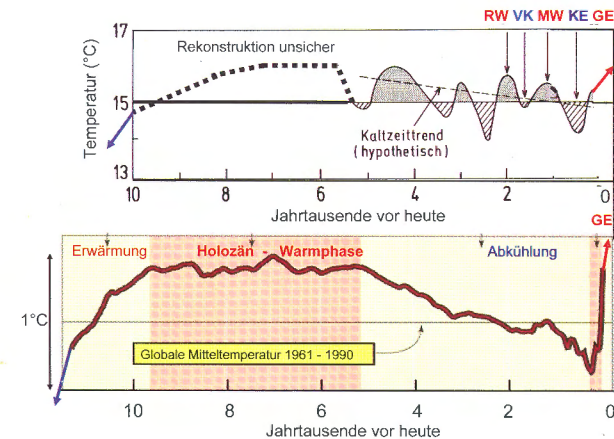


Abb. 17. Unten relative Änderungen der global gemittelten bodennahen Lufttemperatur im Holozän nach MARCOTT et al.¹⁴⁵, oben entsprechende Temperaturrekonstruktion für die Nordhemisphäre nach älteren Quellen, insbesondere CLARK¹⁶, die zwar mittlerweile unsicher sind, aber die historisch belegten überlagerten Fluktuationen der letzten Jahrtausende besser erkennen lassen. Dabei bedeuten die Abkürzungen: RW Römerzeit-Warmphase, VK Völkerwanderung-Kaltphase, MW Mittelalterliche Warmphase, KE „Kleine Eiszeit“, GE Globale Erwärmung (im Industriezeitalter). Ab 11600 bis ca. 10000 Jahre vor heute hat der Übergang von der Würm-Kaltzeit (Pleistozän) ins Holozän stattgefunden.

- 66 Lamb, H.H., 1991: Historic storms of the North Sea, British Isles and Northwest Europe. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- 67 Latif, M., 2009 → Bibliographie
- 68 Latif, M., 2012 → Bibliographie
- 69 Lexikon der Geowissenschaften (Redaktion: LANDSCAPE Ges. f. Geo-Kommunikation, Köln), 6 Bände, 2000-2002. Spektrum Akadem. Verlag, Heidelberg-Berlin.
- 70 Lenton, T.M. et al., 2008: Tipping elements in the Earth's climate system. *PNAS* **105**, 1786–1793.
- 71 Liou, K.N., 1992: Radiation and Cloud Processes in the Atmosphere. Oxford. Univ. Press, New York.
- 72 Lozán, J.L., Grassl, H., Hupfer, P. (Hrsg.), 1998: Warnsignal Klima. Das Klima des 21. Jahrhunderts. Wiss. Auswertungen und GEO, Hamburg.
- 73 Lozán, J.L. et al. (Hrsg.), 2005: Warnsignal Klima. Genug Wasser für alle? Wiss. Auswertungen und GEO, Hamburg.
- 74 Manabe, S., Möller, F., 1961: On the radiative equilibrium and heat balance of the atmosphere. *Monthly Weath. Rev.* **31**, 118–133.
- 75 Manabe, S., Wetherald, R.T., 1967: Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity. *J. Atmos. Sci.* **24**, 241–259.
- 76 Manabe, S., Bryan, K., 1969: Climate circulation with a combined ocean-atmosphere model. *J. Atmos. Sci.* **26**, 786–789.
- 77 Manley, G., 1974: Central England temperatures: monthly means 1659-1973. *Quart. J. Roy. Met. Soc.* **100**, 389–405.
- 77a Marcott, S.A., 2013: A reconstruction of regional and global temperatures for the past 11,300 years. *Science* **339**, 1198–1201.
- 78 Martens, P. et al., 1999: Climate change and future populations at risk of malaria. *Glob. Environm. Change* **9**, 89–107.
- 79 McCormick, P.M., Thomason, L.W., Trepte, C.E., 1995: Atmospheric effects of Mt. Pinatubo eruption. *Nature* **373**, 399–404.
- 80 Moberg, A. et al., 2005: Highly variable Northern Hemisphere temperature reconstructed from low and high-resolution proxy data. *Nature* **433**, 613–617.
- 81 Mosbrugger, V., et al. (Hrsg.), 2012 → Bibliographie
- 82 Moss, R.H., 2010: The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* **463**, 747–756.
- 83 Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft (MunichRe): Topics Geo (jährlich erscheinende Schadensberichte). Selbstverlag, München.
- 84 Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft (MunichRe), 1990: Sturm. Selbstverlag, München.
- 85 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, USA), Internet: <http://www.noaa.gov>
- 86 NSIDC (National Snow and Ice Data Center, USA), Internet: <http://nsidc.org>
- 87 Oeschger, H. et al., 1980 → Bibliographie
- 88 Oschmann, W., et al., 2000: Evolution des Systems Erde. Senckenbergische Naturforsch. Ges., Kleine Senckenberg-Reihe Nr. 35, Frankfurt a.M.
- 89 Oschmann, W., 2016: Evolution der Erde (2. Aufl.). Haupt, Bern.

- 90 Papst Franziskus, 2015: Laudato si (, mi signore, cun tucte le tue creature). Die Umwelt-Enzyklika des Papstes. Vollständige Ausgabe. Herder, Freiburg
- 91 Peixoto, J.P., Oort, A.H., 1992: Physics of Climate. American Inst. of Physics, New York.
- 92 Pfister, C., 1999 → Bibliographie
- 93 Quadfasel, D., 2005: The Atlantic heat conveyor slows. *Nature* **438**, 565–566.
- 94 Quedens, G., 1992: Nordsee – Mordsee. M. Siegel, Breklum.
- 95 Rahmstorf, S., 2002: Ocean circulation and climate during the past 120,000 years. *Nature* **419**, 207–214.
- 96 Rahmstorf, S., 2010: A new view on sea level rise. *Nature Clim. Change* **4**, 44–45.
- 97 Rahmstorf, S. et al., 2015: Exceptional twentieth-century slowdown in Atlantic ocean overturning circulation. *Nature Clim. Change* **5**, 475–480.
- 98 Rahmstorf, S., Schellnhuber, H.J., 2018 → Bibliographie
- 99 Rapp, J., 2000: Konzeption, Problematik und Ergebnisse klimatologischer Trendanalysen für Europa und Deutschland. Bericht Nr. 212, Deut. Wetterdienst (Selbstverlag), Offenbach a.M.
- 100 Robine, J.-M., et al., 2010: Death toll exceeded 70,000 in Europe during summer 2003. *Comptes Rendus Biol.* **331**, 171–178.
- 101 Roedel, W., Wagner, T., 2010: Physik unserer Umwelt. Die Atmosphäre. Springer, Berlin-Heidelberg.
- 102 von Rudloff, H., 1967: Die Schwankungen und Pendelungen des Klimas in Europa seit Beginn der regelmäßigen Instrumenten-Beobachtungen. Vieweg, Braunschweig.
- 103 Sagan, C., Mullen, G., 1972: Earth and Mars: Evolution of atmospheres and surface temperatures. *Science* **177**, 52–56.
- 104 Saltzman, B., 2002: Dynamical Paleoclimatology. Academic Press, San Diego.
- 105 Samaniego, L., et al., 2018: Anthropogenic warming exacerbates European soil moisture droughts. *Nature Clim. Change* **8**, 421–426.
- 106 Sato, M., et al.: Stratospheric aerosol optical depth 1850–1990. *J. Geophys. Res.* **98**, 22987–22994; Updates via Internet.
- 107 Schär, C., et al., 2004: The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature* **427**, 332–336.
- 108 Schellnhuber, H.J., 2015 → Bibliographie
- 109 Schellnhuber, H.J., Sterr, H., 1993: Klimaänderung und Küste. Springer, Berlin-Heidelberg.
- 110 Schmincke, H.-U., 2000: Vulkanismus. Wiss. Buchges., Darmstadt.
- 111 Schönwiese, C.-D., 1979: Klimaschwankungen. Verständliche Wissenschaft, Band 115. Springer, Berlin-Heidelberg-New York.
- 112 Schönwiese, C.-D., 1987: Climate variations. In Fischer, G. (ed): Landolt-Börnstein Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology. Vol. V/4/c1, 15-1-15-22. Springer, Berlin-Heidelberg.
- 113 Schönwiese, C.-D., 1997: Zwischen „Katastrophe“ und „Schwindel“. Anmerkungen zur Klimadebatte. *Universitas* **52**, 983–990.
- 114 Schönwiese, C.-D., Staeger, T., Trömel, S., 2004: The hot summer 2003 in Germany. *Meteorol. Z., N.F.*, **13**, 343–347.

- 115 Schönwiese, C.-D., 2013 → Bibliographie
- 116 Schönwiese, C.-D., 2013: Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler. Borntraeger, Stuttgart.
- 117 Schultz, H.R., et al., 2005: Der Einfluss klimatischer Veränderungen auf die phänologische Entwicklung der Rebe, der Sorteneignung sowie Mostgewicht und Säurestruktur der Trauben. Projektbericht, Forschungsanstalt Geisenheim, Fachgebiet Weinbau, Geisenheim.
- 118 Schweingruber, F.H., 1983: Der Jahrring. Haupt, Bern.
- 119 Shepherd, A., Fricker, H.A., Farrell, S.L., 2018: Trends and connections across the Antarctic cryosphere. *Nature* **558**, 223–232.
- 120 Seidl, R., et al., 2017: Forest disturbances under climate change. *Nature Clim. Change* **7**, 395–402.
- 121 Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung, 2017: Mücken: Eine kommt, die andere geht. Pressemitteilung (10.04.2017), Frankfurt a.M.
- 121a Solar Influences Data Analysis Center (SIDC), Internet: <http://sidc.oma.be>
- 122 Simkin, T., et al. (eds.), 1981: Volcanoes of the World. Smithsonian Institution, USA. Hutchinson, Stroudsburg; Updates via Internet (Smithsonian Institution).
- 123 Smith, G. et al., 1982: Paläokontinentale Weltkarten des Phanerozoikums. Enke, Stuttgart.
- 124 Steffen, W., Crutzen, P.J., McNeill, J.R., 2007: The Anthropocene: Are humans now overwhelming the great forces of nature? *Ambio* **36**, 614–621.
- 125 Stehr, N., von Storch, H., 2000 → Bibliographie
- 126 Stephenson, D.B., Wanner, H., Brönnimann, S., Luterbacher, J., 2002: The history of scientific research on the North Atlantic Oscillation. In Hurrell, J.W., et al. (eds.): *The North Atlantic Oscillation*. Geoph. Monogr. **134**, 37–50.
- 127 Stern, N., 2007: *The Stern Review. The Economics of Climate Change*. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- 128 Sterr, H., 2007: Folgen des Klimawandels für Ozeane und Küsten. In Endlicher, W., Gerstengarbe, F.-W. (Hrsg.) → Bibliographie, S. 86–97.
- 129 Stocker, T.F., 2007: Polare Eisbohrkerne – Eckpfeiler der Klimarekonstruktion. *Geogr. Rdsch.* **59**, 40–48.
- 130 von Storch, H., et al., 1999 → Bibliographie
- 131 Streit, B., 2010: Verlust der biologischen Vielfalt. *Forschung und Lehre* **9/10**, 654–656.
- 132 Streit, B., Böhning-Gaese, Mosbrugger, V., 2011: Biodiversität und Klima: Wandel in vollem Gang. *Biol. uns. Zeit* **41**, 248–255.
- 133 Thornalley, D.J.R. et al., 2018: Anomalously weak Labrador Sea convection and Atlantic overturning during the past 150 years. *Nature* **556**, 227–230.
- 134 Trenberth, K. (ed.), 1992: *Climate System Modeling*. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- 135 Unsöld, A., Baschek, B., 2004. *Der neue Kosmos. Einführung in die Astronomie und Astrophysik* (7. Aufl.). Springer, Berlin-Heidelberg.

- 136 Usoskin, I.G. et al., 2003: Millenium-scale sunspot number reconstruction: Evidence for an unusually active sun since 1940s. *Physica. Rev. Letters* **91**, 211102-1-211102-4.
- 137 Wanner, H. et al., 2008: Mid- to late Holocene climate change: an overview. *Quaternary Sci. Rev.* **27**, 1791–1828.
- 138 Wanner, H., 2016 → Bibliographie
- 139 Warneck, P., Wurzinger, A., 1987: Chemical composition of and chemical reactions in the atmosphere. In Fischer, G. (ed.): *Landolt-Börnstein Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology*, Vol. V/4b, S. 457–570. Springer, Berlin-Heidelberg.
- 140 Wigley, T.M.L., et al., 1981: *Climate and History*. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- 140a Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU), 2011: *Globale Megatrends*. Factsheet Nr. 3. Berlin – Siehe auch 2008: *Globale Welt im Wandel – Sicherheitsrisiko Klimawandel*. Springer, Berlin-Heidelberg.
- 141 World Meteorological Organisation (WMO), 1979: *Proceedings of the World Climate Conference*. WMO Publ. No. 537, Geneva.
- 142 World Meteorological Organisation (WMO), 2015: *Warming trend continues in 2014*. Press Release 02.02.2015, 4 pp., Geneva.
- 143 Wyrтки, K., 1982: The Southern Oscillation, ocean-atmosphere interaction, and El Niño. *Marine Technol. Soc. J.* **16**, 3–10.
- 144 Köppen, W., Wegener, A., 2015 → Bibliographie