



KLIMA

UND

Christian Pfister  
Heinz Wanner

GESELL-

SCHAFT

IN

EUROPA

Die letzten tausend Jahre

■ Haupt

# **Klima und Gesellschaft in Europa. Die letzten tausend Jahre**

**■ Haupt**



**Christian Pfister, Heinz Wanner**

# **Klima und Gesellschaft in Europa.**

## **Die letzten tausend Jahre**

**Haupt Verlag**

1. Auflage 2021

Gestaltung und Satz: Katarina Lang mit Nikolaj Jaberg und Kezia Stingelin

Lithos: FdB - Für das Bild, Fred Braune

Umschlagsbild: Hendrick Avercamp. Winterlandschaft mit Eisläufern (1608). Rijksmuseum Amsterdam, angekauft mit der Unterstützung der Vereinigung Rembrandt. Public Domain; [www.rijksmuseum.nl/collectie/SK-A-1718](http://www.rijksmuseum.nl/collectie/SK-A-1718)

Diese Publikation ist in der Deutschen Nationalbibliografie verzeichnet. Mehr Informationen dazu finden Sie unter <http://dnb.dnb.de>.

Der Haupt Verlag wird vom Bundesamt für Kultur für die Jahre 2021 – 2024 unterstützt.

ISBN 978-3-258-08182-3 (E-Book 978-3-258-48182-1)

Alle Rechte vorbehalten

Copyright © 2021 Haupt, Bern

Jede Art der Vervielfältigung ohne Genehmigung des Verlags ist unzulässig.

Die Autoren und der Verlag haben sich bemüht, sämtliche Copyrightinhaber ausfindig zu machen. Bei Unstimmigkeiten wenden Sie sich bitte an den Verlag.

*Diese Publikation erscheint auch in einer englischen Ausgabe:*

*978-3-258-08234-9 (Print), 978-3-258-48234-7 (E-Book)*

[www.haupt.ch](http://www.haupt.ch)

<b>Vorwort</b> .....	<b>8</b>
Abkürzungen .....	<b>10</b>
<b>1. Einleitung</b> .....	<b>13</b>
1.1 Das Zeitalter der raschen Erwärmung – eine neue Ausgangsbasis für die Klima- geschichte	<b>14</b>
1.2 Zwei Wissenschaftskulturen	<b>15</b>
1.3 Gemeinsamkeiten	<b>20</b>
1.4 Das Klimasystem	<b>24</b>
1.5 Die globale Energiebilanz – treibende Kraft des Klimasystems	<b>27</b>
1.6 Wodurch wurden die Energie- und Tempera- turschwankungen im Holozän bestimmt?	<b>28</b>
1.7 Zirkulation, Energie- und Massenaustausch – Grundelemente der Klimadynamik	<b>31</b>
1.8 Störungen der Antriebsprozesse und interne Variabilität erzeugen den Klimawandel	<b>35</b>
1.9 Der Aufbau des Buches	<b>40</b>
<b>2. Ötzi Weckruf</b> .....	<b>43</b>
2.1 Einleitung	<b>44</b>
2.2 Begegnung mit einer neolithischen Mumie Einschub 2A: «Der bestuntersuchte Körper der Welt» (Albert Zink)	<b>44</b>
2.3 Ötzi letzte Reise Einschub 2B: Der längerfristige klimage- schichtliche Hintergrund	<b>48</b>
2.4 Ötzi und der Übergang zu kühlerem Klima am Ende des Mittelholozäns	<b>54</b>
2.5 Fazit	<b>58</b>
<b>3. Der lange Arm des Tambora</b> .....	<b>61</b>
3.1 Einleitung	<b>62</b>
3.2 Stockdunkle Nacht zur Mittagszeit	<b>62</b>
3.3 Ein globales Wetterchaos Einschub 3A: Katastrophenalarm im Bergtal	<b>63</b>
3.4 Europas letzte Subsistenzkrise	<b>69</b>
3.5 Ein Mosaik von Verletzlichkeiten	<b>72</b>
3.6 Zu viele Hungerflüchtlinge? Einschub 3B: Die Geburt von Frankenstein und Dracula	<b>79</b>
3.7 Fazit	<b>83</b>
<b>4. Von der Witterungsbeschreibung zur Klimawissenschaft</b> .....	<b>85</b>
4.1 Einleitung	<b>86</b>
4.2 Eine beseelte Umwelt	<b>87</b>
4.3 Die Entwicklung der Witterungschronik	<b>89</b>
4.3.1 Das Erbe der Griechen und der Araber	
4.3.2 Die Renaissance des 12. Jahrhunderts	
4.3.3 Die Diskurs Herrschaft der Kirche	
4.3.4 Herausragende Chronisten	
4.4 Aufzeichnungen des täglichen Wetters	<b>96</b>
4.4.1 Der Glaube an die Macht der Sterne	
4.4.2 Tägliche Wetteraufzeichnungen auf den Weltmeeren	
4.4.3 Herausragende Wettertagebücher und ihre Verfasser	
4.5 Die instrumentelle Messung des Wetters	<b>105</b>
4.5.1 Ein Silicon Valley der Meteorologie in Italien	
4.5.2 Die Schaffung von meteorologischen Messnetzen	
4.6 Ein Bruch mit der Vergangenheit	<b>110</b>
4.6.1 Der Aufstieg der wissenschaftlichen Meteorologie und der Klimatologie	
4.6.2 Die Tabuisierung der Extreme	
4.7 Fazit	<b>115</b>
<b>5. Die Rekonstruktion des vergangenen Klimas.</b>	<b>117</b>
5.1 Einleitung	<b>118</b>
5.2 Klimarekonstruktionen aus Archiven der Natur	<b>118</b>
5.2.1 Klimasignale und ihre Datierung	
5.2.2 Bäume erinnern sich	
5.2.3 Schlick mit einem Langzeitgedächtnis	
5.2.4 Eisbohrkerne – langfristige, gefrorene Klimakalender	
5.2.5 Stalagmiten – ein tropfenweise wachsendes Archiv	
5.2.6 Gletscher und Baumgrenzen – integrative Zeugen des Klimaverlaufs	
5.3 Klimarekonstruktionen aus Archiven der Gesellschaft	<b>131</b>
5.3.1 Ein Puzzle mit fehlenden Teilen	
5.3.2 Wie Gletscher zu Bildern wurden	
5.3.3 Vom Wert historischer Buchhaltungen	
5.3.4 Die Witterung des Sommerhalbjahrs im Lichte des Weinbaus	
5.3.5 Religiöse Rituale gegen den Klimastress	
5.4 Indizes – zahlenmäßige Bewertungen von Witterungsberichten und Proxydaten	<b>143</b>
5.5 Ausblick auf die Kapitel 6 bis 8	<b>146</b>
<b>6. Das Klima Europas – Gegenwart und Vergangenheit</b> .....	<b>149</b>
6.1 Topographie und Klima auf einen Blick	<b>150</b>
6.2 Räumlicher Überblick über das aktuelle europäische Klima	<b>151</b>
6.3 Ein 1000 Jahre langer Überblick	<b>156</b>
6.4 Eine Klimasimulation über 1000 Jahre	<b>163</b>
<b>7. Die Periode des Hochmittelalters (1000–1300)</b> .....	<b>165</b>
7.1 Einleitung und Hinweise auf die Quellenlage	<b>166</b>

- 7.2 Eine Warmperiode um das Jahr 1000 **167**  
Einschub 7A: Die Entdeckungsfahrten der Wikinger – von Island in die Neue Welt
  - 7.3 Das 11. Jahrhundert **171**
    - 7.3.1 Die Winter von 1000 bis 1099  
Einschub 7B: Der Gang nach Canossa – eine Erfindung?
    - 7.3.2 Die Sommer von 1000 bis 1099
    - 7.3.3 Überblick über das Klima im 11. Jahrhundert
  - 7.4 Das 12. Jahrhundert **175**
    - 7.4.1 Die Winter von 1100 bis 1199
    - 7.4.2 Die Sommer von 1100 bis 1199
    - 7.4.3 Überblick über das Klima im 12. Jahrhundert
  - 7.5 Das 13. Jahrhundert **179**
    - 7.5.1 Die Winter von 1200 bis 1299
    - 7.5.2 Die Frühjahre von 1200 bis 1299
    - 7.5.3 Die Sommer von 1200 bis 1299  
Einschub 7C: Olivenbäume in Köln
    - 7.5.4 Überblick über das Klima im 13. Jahrhundert
- 8. Die Nordhemisphärische Kleine Eiszeit und das Kurze 20. Jahrhundert (1300-1988) ..... 185**
- 8.1 Einleitung **186**
  - 8.2 Das schicksalhafte 14. Jahrhundert **187**
    - 8.2.1 Die Winter von 1300 bis 1399
    - 8.2.2 Die Frühjahre von 1300 bis 1399
    - 8.2.3 Die Sommer von 1300 bis 1399  
Einschub 8A: Die Jahrtausendflut vom Juli 1342
    - 8.2.4 Überblick über das Klima im 14. Jahrhundert  
Einschub 8B: Die Blümlisalp-Sage
  - 8.3 Das frostige 15. Jahrhundert **197**
    - 8.3.1 Die Winter von 1400 bis 1499
    - 8.3.2 Die Frühjahre von 1400 bis 1499  
Einschub 8C: Wölfe in Paris
    - 8.3.3 Die 14 Monate lange Dürreperiode von 1473 bis 1474  
Einschub 8D: Merkmale herausragender heißer und trockener Sommer in Europa
    - 8.3.4 Die Sommer von 1400 bis 1499
    - 8.3.5 Die Herbste von 1400 bis 1499
    - 8.3.6 Überblick über das Klima im 15. Jahrhundert
  - 8.4. Die zwei Gesichter des 16. Jahrhunderts **208**
    - 8.4.1 Die Winter von 1500 bis 1599
    - 8.4.2 Die Frühjahre von 1500 bis 1599
    - 8.4.3 Die Sommer von 1500 bis 1599
    - 8.4.4 Die elf Monate dauernde Hitze und Dürre im Jahr 1540
    - 8.4.5 Die Herbste von 1500 bis 1599  
Einschub 8E: Das Schicksal der Spanischen Armada
  - 8.4.6 Die Jahrestemperaturen von 1500 bis 1599
  - 8.4.7 Überblick über das Klima im 16. Jahrhundert
  - 8.5 Das sprunghafte 17. Jahrhundert **223**
    - 8.5.1 Die Winter von 1600 bis 1699
    - 8.5.2 Die Frühjahre von 1600 bis 1699
    - 8.5.3 Die Sommer von 1600 bis 1699  
Einschub 8F: Das verheerendste Inferno in Friedenszeiten
    - 8.5.4 Die Herbste von 1600 bis 1699
    - 8.5.5 Die Jahrestemperaturen von 1600 bis 1699
    - 8.5.6 Überblick über das Klima im 17. Jahrhundert  
Einschub 8G: Warum die Grönlandwale überlebten
  - 8.6 Das ruhige 18. Jahrhundert **237**
    - 8.6.1 Die Winter von 1700 bis 1799  
Einschub 8H: Die plötzliche Erwärmung der Stratosphäre und der Temperatursturz von 1709
    - 8.6.2 Die Frühjahre von 1700 bis 1799
    - 8.6.3 Die Sommer von 1700 bis 1799  
Einschub 8I: Fünf Monate vulkanischer Nebel über Europa
    - 8.6.4 Die Herbste von 1700 bis 1799
    - 8.6.5 Die Jahrestemperaturen von 1700 bis 1799
    - 8.6.6 Überblick über das Klima im 18. Jahrhundert
  - 8.7 Der Tiefpunkt der Kälte im 19. Jahrhundert **248**
    - 8.7.1 Einleitung
    - 8.7.2 Die Winter von 1800 bis 1899  
Einschub 8J: Denkwürdige Anlässe und sportliche Aktivitäten auf dem Eis
    - 8.7.3 Die Frühjahre von 1800 bis 1899
    - 8.7.4 Die Sommer von 1800 bis 1899
    - 8.7.5 Die Herbste von 1800 bis 1899
    - 8.7.6 Die Jahrestemperaturen von 1800 bis 1899
    - 8.7.7 Überblick über das Klima im 19. Jahrhundert
  - 8.8 Die langsame Erwärmung im Kurzen 20. Jahrhundert **257**
    - 8.8.1 Die Winter von 1900 bis 1999  
Einschub 8K: Eine letzte Erinnerung an die Kleine Eiszeit
    - 8.8.2 Die Frühjahre von 1900 bis 1999
    - 8.8.3 Die Sommer von 1900 bis 1999
    - 8.8.4 Die Herbste von 1900 bis 1999
    - 8.8.5 Die Jahrestemperaturen von 1900 bis 1999
    - 8.8.6 Überblick über das Klima im 20. Jahrhundert
  - 8.9. Die Jahrestemperaturen von 1500 bis 1999 **266**

<b>9. Witterung, Klima und die Welt der Menschen</b> .....	<b>267</b>	10.2 Schwankungen der Gletscher	<b>334</b>
9.1 Einleitung	<b>268</b>	10.3 Schwankungen der Baumgrenze	<b>339</b>
9.2 Die Bevölkerungsentwicklung als neue Bezugsgröße	<b>270</b>	10.4 Klimaschwankungen und die menschliche Welt	<b>340</b>
9.3 Das demographische Treibhaus im Hochmittelalter	<b>274</b>	<b>11. Von der langsamen zur raschen Klimaerwärmung</b> .....	<b>343</b>
9.4 Rückschlag und Stagnation	<b>284</b>	11.1 Gefangen im Treibhaus: Von der Früherkennung bis zum vollen Erscheinungsbild	<b>344</b>
Einschub 9A: Biologische Kriegsführung und der Schwarze Tod		11.1.1 Einleitung	
Einschub 9B: Vom Schmieden des Hexenhammers		11.1.2 Wissenschaftliche Pioniere und frühe Warner	
9.5 Gegensätzliche Tendenzen im 16. Jahrhundert	<b>292</b>	11.1.3 Die Treibhausdebatte erreicht die internationale Ebene	
Einschub 9C: Das Zeitalter der Hexenjagden 1570 bis 1630		11.1.4 Die Treibhauskontroverse	
9.6 Ein Füllhorn von Innovationen	<b>299</b>	11.2 Das «1950er-Syndrom»	<b>353</b>
9.6.1 Neue demografische Impulse		11.3 Der plötzliche Übergang zur raschen Erwärmung	<b>359</b>
9.6.2 Die Durchsetzung der Quarantäne		11.3.1 Die Warmperiode der Gegenwart (WPG)	
9.6.3 Die Modernisierung der Landwirtschaft		11.3.2 Zukünftige Klimaszenarien	
9.7 Schwere Hungersnöte und ihre Überwindung	<b>304</b>	11.4 Die Rückkehr der Verletzlichkeit	<b>366</b>
9.7.1 Die vielen Gesichter des Hungers		<b>Anhang</b> .....	<b>377</b>
9.7.2 Der Einfluss von Klimavariationen		<b>Endnoten</b> .....	<b>378</b>
9.7.3 Die Jahrtausend-Hungersnot von 1195 bis 1197		<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>397</b>
9.7.4 Hungersnöte im 13. Jahrhundert		<b>Quellen</b> .....	<b>415</b>
9.7.5 Die Große Europäische Hungersnot von 1315 bis 1317		<b>Index</b> .....	<b>417</b>
9.7.6 Die Hungersnot von 1437 bis 1438		<b>Abbildungsnachweis</b> .....	<b>419</b>
9.7.7 Bevölkerungswachstum und die Hungersnot von 1569 bis 1574		<b>Dank an die Sponsoren</b> .....	<b>424</b>
9.7.8 Die Dauerkrise von 1585 bis 1601		<b>Online-Anhang</b>	
9.7.9 Hungersnöte im 17. und frühen 18. Jahrhundert		Pfister, Christian; Wanner, Heinz (2021). Klima und Gesellschaft in Europa. Die letzten tausend Jahre. Digital Appendix DOI 10.7892/boris.148155 oder <a href="https://boris.unibe.ch/id/eprint/148155">https://boris.unibe.ch/id/eprint/148155</a>	
9.7.10 Subsistenzkrisen und Hungersnöte im späteren 18. und im 19. Jahrhundert		Tabelle 1 Abgekürzte Nachweise für Winter Indizes (>1 und <-1) 1000 bis 1499	
9.8 Fazit	<b>318</b>	Tabelle 2 Abgekürzte Nachweise für Frühjahrs Indizes (>1 und <-1) 1200 bis 1499	
<b>10. Das europäische Klima während des letzten Jahrtausends</b> .....	<b>321</b>	Tabelle 3 Abgekürzte Nachweise für Sommer Indizes (>1 und <-1) 1000 bis 1499	
10.1 Das Klima von 1000 bis 1989 in jahreszeitlicher Auflösung	<b>322</b>	Tabelle 4 Nachweis der Referenzen mit Abkürzung AL	
10.1.1 Einleitung		Tabelle 5 Nachweis der Referenzen mit Abkürzungen CC, GL, KP, Li, MR, SZ, WP	
10.1.2 Die Entwicklung der saisonalen Temperaturen vor der Warmperiode der Gegenwart (WPG)		Tabelle 6 Liste der saisonalen Pfister-Indizes 1001 to 1999	
10.1.3 Die Antriebsfaktoren und das längerfristige Bild		Tabelle 7 Monatliche und Saisonale Temperaturschätzungen von Petr Dobrovolný (2010)	
10.1.4 Jahreszeitlicher Überblick über das Klima des vergangenen Jahrtausends		Tabelle 8 Geschätzte Saisontemperaturen (Dobrovolný 2010) und Indizes 1500-1999	
10.1.5 Die Übergänge vom HMA zur NKE sowie von der NKE zur WPG		Tabelle 9 Erläuterungen	



# Vorwort

Die Folgen des Klimawandels sind auf absehbare Zeit nicht weniger bedrohlich als die des Covid-19, der im Jahr 2020 Menschen und Wirtschaft überraschte. Die von den Menschen verursachte globale Erwärmung schreitet rasch voran. Wenn wir nicht sofort Vorsorgemaßnahmen ergreifen, wird sie auch in Europa zu bisher unbekanntem Extremereignissen führen.

Zum ersten Mal präsentieren ein Klimatologe und ein Historiker gemeinsam eine Geschichte des Klimas und seiner Auswirkungen auf die Gesellschaft in den letzten 1000 Jahren. Dank der Kombination von natur- und sozialwissenschaftlichen Ansätzen werden in diesem Buch aus beiden Wissensgebieten bedeutende neue Erkenntnisse erarbeitet. Insgesamt war das Schreiben dieses Buches keine leichte Aufgabe. Es hat Jahre gedauert, bis wir an diesen Punkt gelangt sind. Zum Glück war unsere Zusammenarbeit bis zum Schluss spannend und fruchtbar. Das Ergebnis ist ein Buch, das durch seine leicht verständliche Sprache, die Grafik und das Layout gleichzeitig die Bedürfnisse von Spezialisten und eines allgemeinen Publikums erfüllt. Der Text wird in der Form von Einschüben durch illustrierende Geschichten, wissenschaftliche Erläuterungen und Anekdoten ergänzt.

Anhand von Beispielen wie dem Eismann Ötzi verbindet das Buch die warmen Bedingungen zu seinen Lebzeiten vor 5000 Jahren mit dem überraschenden Auftauen seiner Mumie im Jahr 1991. Die Auswirkungen von Vulkanausbrüchen auf das Weltklima und die dadurch betroffenen Gesellschaften werden anhand des Ausbruchs des Vulkans Tambora im Jahr 1815 und detaillierter Einblicke in die daraus resultierende Hungersnot in der östlichen Schweiz im Jahr 1817 dargestellt. Der Verlauf der Temperaturen im vergangenen Jahrtausend wird anhand von Modellen und Proxydaten aus der natürlichen Umwelt im Überblick erläutert. Mögliche Gründe für Klimaschwankungen werden anhand der wichtigsten Antriebsfaktoren diskutiert. Rekonstruktionen der jahreszeitlichen Wetter- und Klimabedingungen auf der Basis dokumentarischer Quellen ergänzen diese Perspektive. Die Ergebnisse werden dann zur Interpretation demographischer, wirtschaftlicher und kultureller Entwicklungen und Phänomene in den letzten 1000 Jahren herangezogen. Das Schlusskapitel weist auf die Bedingungen hin, die zum gegenwärtigen klimatischen Notstand geführt haben, und wagt einen Blick in die Zukunft. Nicht ohne Grund wird es «Die Rückkehr der Verletzlichkeit» genannt.

Der begrenzte Umfang des Buches erlaubte es nicht, Niederschläge und große Naturkatastrophen einzubeziehen, so wie dies ursprünglich geplant war. Aus dem gleichen Grund beschränkte sich ein detaillierter Quellennachweis im Buch auf die bedeutenderen klimatischen Ereignisse. Detaillierte Angaben finden sich im On Line Appendix.

Zahlreiche Institutionen, Sponsoren und Persönlichkeiten haben unsere Arbeit unterstützt. Ein besonderer Dank geht an die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Oeschger-Zentrums für Klimaforschung der Universität Bern, die uns stets großzügig unterstützten und uns die Nutzung der gesamten Infrastruktur ermöglichten.

Wir bedanken uns herzlich bei einer Reihe von Freunden und Kollegen, die trotz ihrer extremen Arbeitsbelastung bereit waren, Kapitel unseres Buches zu rezensieren:

Kapitel 1: Stefan Brönnimann

Kapitel 2: Stefan Brönnimann, Jörg Schibler

Kapitel 3: Stefan Brönnimann, Daniel Krämer

Kapitel 4: Thomas Labbé, Laurent Litzenburger

Kapitel 5: Martin Grosjean, Stefan Brönnimann

Kapitel 6: Stefan Brönnimann, Martin Grosjean

Kapitel 7: Christian Rohr, Astrid Ogilvie

Kapitel 8: Stefan Brönnimann

Kapitel 9: Brian Campbell, Jan de Vries

Kapitel 10: Martin Grosjean

Kapitel 11: Thomas Stocker

Die Verleger Patrizia und Matthias Haupt haben uns von Anfang an in vielfältiger Weise geduldig unterstützt. Tamara Baumann, Carla Laub, Alfred Bretscher (\*), Alex Hermann, Beat Ihly und Veronika Valler haben viele brillante Figuren produziert. Katarina Lang war für das professionelle und kreative Layout verantwortlich. Angela Wade übernahm die anspruchsvolle Aufgabe des kreativen und konsequenten Korrekturlesens, und Tamara Widmer hat für uns unermüdlich Bücher aus Bibliotheken besorgt.

Die Publikation unseres ehrgeizigen Projekts wäre nicht möglich gewesen ohne die äußerst großzügige Unterstützung durch unsere Sponsoren. Sie sind auf Seite 424 speziell aufgeführt. Zahlreiche Kolleginnen, Kollegen und Freunde haben uns mit Ideen, Fachwissen, Daten, Graphiken und zahllosen Ermutigungen unterstützt. Unser großer Dank gilt Mariano Barriendos, Ray Bradley, Rudolf Brázdil, Petr Dobrovolný, Jan Esper, Basilio Ferrante, Dominik Fleitmann, David Frank, Isabella Geissbühler, Oliver Heiri, Fortunat Joos, Johann Jungclaus, Hanspeter Holzhauser, Antoine Jover, Cornelia Kehl, Andrea Kiss, Christian Körner, Peter Lüps, Jürg Luterbacher, Kaspar Meuli, Kurt Nicolussi, Samuel Nussbaumer, Jessica Ochsenbein, Margret Möhl, Kathleen Pribyl, Christoph Raible, Christian Rohr, Manuela Roten, Marlis Röthlisberger, Christoph Schär, Gabriela Schwarz-Zanetti, Silje Sørland, Martin Stuber, Peter Stucki, Nikolaos Theocharis, Willy Tinner, Heinz Veit, Monika Wälti, Hedy Werthmüller, Ursula Widmer und Heinz Zumbühl.

Mit diesem Buch möchten wir unsere Leserinnen und Leser vor allem auf die Folgen des künftigen Klimawandels aufmerksam machen. Wir widmen es unseren Enkeln Kevin, Camilia, Diego und Silvio sowie Amelia und Jaro. Wir hoffen, dass sie eines Tages in einer Welt leben dürfen, in der die Probleme des Klimawandels weniger schwer wiegen als heute!

Bern, März 2021

Christian Pfister und Heinz Wanner

# Abkürzungen

AZ	Atmosphärische Zirkulation	EURAC	Europäische Akademie Bozen
AMOC	Atlantic Meridional Overturning Circulation (Meridionalzirkulation im Atlantischen Ozean)	EURO-CLIMHIST	Euro- Climhist Datenbank zur Klimageschichte Europas ( <a href="https://www.euroclimhist.unibe.ch/de/">https://www.euroclimhist.unibe.ch/de/</a> )
AR	Sachstandsbericht (Assessment Report)	GHD	Datum der Weinernte (grape harvest date)
AMO	Atlantische Multidekadische Oszillation	GHG	Treibhausgas
BC	Vor Christus (before Christ)	GSM	Grosses Solares Minimum
BP	Anzahl Jahre vor heute (before present)	HMA	Hochmittelalter (AD 1000–1300)
CESM	Gekoppeltes Klimamodell (Community Earth System Model)	HTM	Thermisches Maximum des Holozäns (Holocene Thermal Maximum)
CEUT	Central European Temperature (Temperaturreihe Zentraleuropas 1500–1999), in Euro-Climhist	hPa	Hektopascal oder 100 Pascal (100 Newton per m <sup>2</sup> )
CH <sub>4</sub>	Chemische Formel für Methan	IGY	Internationales Geophysikalisches Jahr
CMIP	Modellvergleich mit gekoppelten Klimamodellen (Coupled Model Intercomparison Project)	IPCC	UNO-Klimarat (Intergovernmental Panel on Climate Change)
CO <sub>2</sub>	Chemische Formel für Kohlendioxid	K20JH	Kurzes 20. Jahrhundert (1900–1987)
COP	UNO-Vertragsstaatenkonferenz (Conference of the Parties)	LIA	Internationale Bezeichnung für «Kleine Eiszeit»
CORDEX	Koordiniertes Experiment zur regionalen Herunterskalierung von Klimamodellen (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment)	MIT	Massachusetts Institute of Technology
EIKE	Europäisches Institut für Klima und Energie	MCA	Mittelalterliche Klimaanomalie
ENSO	El Niño Südliche Oszillation	MWP	Moderne Warmperiode
		N <sub>2</sub> O	Chemische Formel für Distickstoffmonoxid (populär: Lachgas)
		NAO	Nordatlantische Oszillation
		NCAR	National Center of Atmospheric Research (Boulder, USA)
		NKE	Nordhemisphärische Kleine Eiszeit (AD 1300–1900)
		O <sub>3</sub>	Chemische Formel für Ozon
		OZ	Oceanzirkulation

PAGES	Paläoklimaprojekt «Past Global Changes»
PIK	Potsdam Institut für Klimafolgenforschung
PMIP <sub>3</sub>	Paläoklima-Modellvergleich, Phase III
RCM	Regionales Klimamodell (regional climate model)
SDI	Strategische Verteidigungsinitiative (Strategic Defense Initiative)
SKE	Südhemisphärische Kleine Eiszeit
SPG	Subpolarer Wirbel im Atlantischen Ozean
SSW	Rasche Stratosphärenenerwärmung (sudden stratospheric warming)
TAR	Dritter Sachstandsbericht der UNO (IPCC Third Assessment Report)
UNEP	UNO-Umweltprogramm
UNFCCC	Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen
W	Watt ( $\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-3}$ )
WCRP	Weltklimaprogramm (World Climate Research Programme)
WMO	Weltorganisation für Meteorologie
WPG	Warmperiode der Gegenwart (1988/89–2020)



# 1. Einleitung

# Das Zeitalter der raschen Erwärmung – eine neue Ausgangsbasis für die Klimageschichte

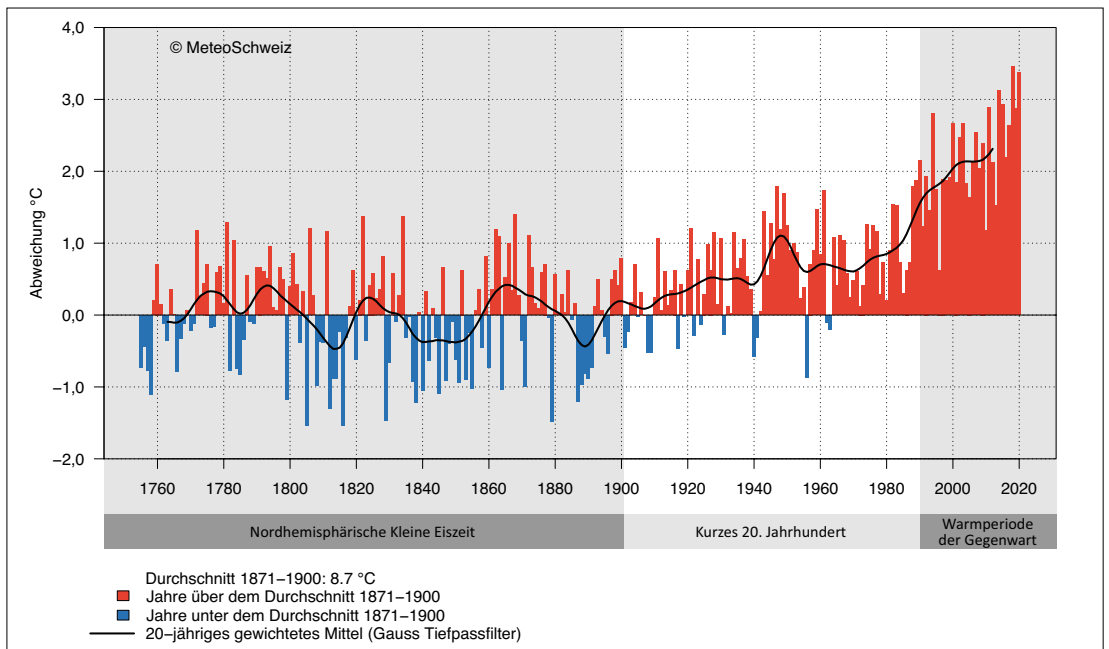
Es ist Zeit für eine neue Geschichte des Klimas und der Gesellschaft, für eine, die der heutigen Situation angemessen ist. Die Klimafrage bleibt ein zentrales Thema in der öffentlichen Diskussion. Die Jugend und die Politik werden sich vermehrt damit auseinandersetzen müssen, denn Extremereignisse werden uns immer stärker unter Druck setzen.

Die heutige Situation ist historisch unvergleichlich. Seit den späten 1950er-Jahren ist der Mensch über seine Rolle als biologischer Akteur hinausgewachsen.<sup>1</sup> Er ist zu einer Macht im geologischen Sinne geworden.<sup>2</sup> Die Natur hat aufgehört, rein natürlich zu sein, nicht zuletzt, seitdem menschliche Aktivitäten zum wichtigsten Antrieb des Klimasystems geworden sind. Der Anstieg der globalen Temperatur seit den späten 1980er-Jahren ist im Vergleich mit den letzten 2000 Jahren einzigartig.<sup>3</sup> Er hat unseren Blick auf das vergangene Klima grundlegend verändert. Nicht mehr das gemäßigte 20. Jahrhundert wird mit früheren kälteren oder wärmeren Perioden verglichen, sondern das gegenwärtige Zeitalter der raschen Erwärmung. Der Vergleich mit der Vergangenheit hat für die Beurteilung der Gegenwart und den Blick in die Zukunft seit jeher eine zentrale Rolle gespielt. Nach dem italienischen Philosophen Benedetto Croce ist Geschichtsschreibung stets eine Interpretation der Vergangenheit im Licht der Gegenwart.<sup>4</sup> Diese Erkenntnis gilt auch für die Klimageschichte.

Messreihen der Temperaturen in Europa sind in erheblicher Dichte seit der Mitte des 18. Jahrhunderts verfügbar. Die Reihe der Jahrestemperaturen in Basel (Schweiz) seit 1755 vermittelt einen Einblick in die Entwicklung in den letzten 265 Jahren (Abb.1.1). Sie lässt sich in drei Abschnitte unterteilen: Der erste von 1755 bis 1900 gilt als letzter Teil der nordhemisphärischen Kleinen Eiszeit (NKE).<sup>5</sup> Daran schließt im kurzen 20. Jahrhundert (K20JH) eine zweite Periode der langsamen anthropogenen Erwärmung an. Sie endet um 1988, wo die Temperaturen sprunghaft auf das Niveau der Warmperiode der Gegenwart (WPG) ansteigen (siehe Tabelle 1.2). Es handelt sich buchstäblich um ein heißes Thema.

Daten aus der Vergangenheit zeigen, wie eine kältere Welt ausgesehen hat, und deuten zugleich darauf hin, wie eine wärmere Welt in der Zukunft aussehen könnte, und zwar nicht nur in Bezug auf die Mittelwerte, sondern auch auf die Extreme. Ein Blick in die Vergangenheit zeigt, dass manchmal bereits relativ kleine Verschiebungen der Mittelwerte große Auswirkungen nach sich zogen. Um zu verstehen, wie die Gesellschaft den Klimawandel meistern kann oder nicht, müssen wir untersuchen, wie Kultur und Wirtschaft in der Vergangenheit vom Klima betroffen waren und wie Menschen auf klimatische Herausforderungen reagiert und sich an diese angepasst haben. Um Ereignisse und Entwicklungen in Kultur und Wirtschaft zu verstehen, müssen wir den möglichen Einfluss von Witterung und Klima mit in die Betrachtung einbeziehen.

Warum ein Buch? Wissenschaftliche Zeitschriften liefern kurzfristig neue Erkenntnisse in Form von kleinen Häppchen, die für Fachfremde schwer zu verstehen sind. Größere Zusammenhänge müssen auf mehrere Arbeiten



**Abb. 1.1.** Anomalien der Jahresmitteltemperaturen in Basel/Binningen von 1755 bis 2020, bezogen auf den Mittelwert von 1871 bis 1900. Quelle: Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz. <https://www.meteoswiss.admin.ch/home/climate/climate-change-in-switzerland.html>; abgerufen am 23. Januar 2021.

in verschiedenen Zeitschriften verteilt oder in Sammelbände eingebracht werden, die wissenschaftlichen Qualitätskriterien oft nicht entsprechen. Ein Gesamtbild kommt so nicht zustande. Ein Sack voller Krümel ist nicht dasselbe wie ein Laib Brot. Mehr Raum für umfassende Betrachtungen, die längerfristig Bestand haben, bietet einzig eine Synthese in Buchform.

Bücher zur Geschichte des Klimawandels wurden bisher entweder von Klimatologen oder von Historikern geschrieben, da die Wissenschaftskulturen der Natur- und Geisteswissenschaften nur schwer miteinander in Einklang zu bringen sind. Dieses Buch ist als erstes von einem Klimatologen mit einem Gespür für Geschichte gemeinsam mit einem Historiker mit Kenntnissen in Klimatologie verfasst worden. Aus diesem Grund sind das Konzept und manche Erkenntnisse grundlegend neu.

## 1.2

## Zwei Wissenschaftskulturen

Der Klimawandel und seine Auswirkungen auf menschliche Kulturen wird von Vertretern zweier unterschiedlicher Wissenschaftskulturen untersucht, jener der Naturwissenschaften, insbesondere der Klimatologie, und jener der Geistes- und Sozialwissenschaften, insbesondere der (Umwelt-)Geschichte. Die beiden Kulturen verfolgen unterschiedliche Ziele; sie haben ihren eigenen Denkstil und verwenden unterschiedliche Darstellungsweisen. Naturwissenschaftlerinnen und Naturwissenschaftler erklären, wie natür-



liche Systeme funktionieren, während (Umwelt-)Historikerinnen und Historiker Geschichten von Menschen erzählen, die sich mit den Auswirkungen von Witterung und Klima befassen. Naturwissenschaftler argumentieren systematisch und streben nach größtmöglicher Präzision und Vollständigkeit, während Historiker ausgehend von einigen wenigen Grundfragen einen roten Faden für ihre Erzählungen suchen. Naturwissenschaftliches Denken folgt wissenschaftlicher Logik, während Historiker ihre Erzählstränge aus rationalen und emotionalen Elementen aufbauen, die beide zum Wesen des Menschen gehören.

Ein weiterer Unterschied zwischen den beiden Wissenskulturen besteht darin, dass Natur- und Geschichtswissenschaften unterschiedliche Belege zur Rekonstruktion des Klimas für die Zeit vor dem Aufkommen von Messinstrumenten heranziehen. Naturwissenschaftler stützen sich auf physische Indikatoren, die Proxy-Daten genannt werden (Tabelle 1.1). Sie sind in Archiven der Natur gespeichert. Die Analyse jedes natürlichen Archivs erfordert spezifische Kenntnisse der physikalischen, chemischen oder biologischen Prozesse, die den jeweiligen Daten und deren Beziehung zu vergangenen Klimaten zugrunde liegen. Man unterscheidet zwischen biologischen Proxies wie Baumringen, Pollen in Torfmooren oder dem Wachstum von Muscheln einerseits und nicht-biologischen Proxies wie Eisbohrkernen aus der Arktis und Antarktis, Ablagerungen in Tropfsteinhöhlen und Sedimenten aus Meeren, Seen und Flüssen andererseits. Proxies aus Archiven der Natur werden im Teilkapitel 5.2 erläutert.

Der Begriff Archive der Gesellschaft bezieht sich in einem weiten Sinne auf Medien, die historische Quellen enthalten. Die Geschichtswissenschaften verwenden den Begriff «Quelle» in einem übertragenen Sinne: So wie man Wasser aus einem Brunnen schöpft, greift der Historiker zur Beantwortung

Archive der Natur		Gesellschaft		
Direkte, wetterbezogene Beobachtungen		Narrative Berichte	Messwerte	
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Extremereignisse</li> <li>• Witterung</li> <li>• Tageswetter</li> <li>• Naturkatastrophen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Luftdruck</li> <li>• Temperatur</li> <li>• Niederschlag</li> <li>• Abfluss</li> </ul>	
Indirekte, Proxy-Informationen	Organisch	Nicht organisch	Organisch	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baumringe</li> <li>• Pollen</li> <li>• Überreste von Pflanzen und Tieren</li> <li>• Fossiles Holz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eisbohrkerne</li> <li>• Jährliche Sedimentschichten</li> <li>• Ablagerungen in Gewässern</li> <li>• Kalkablagerungen in Tropfsteinen</li> <li>• Bohrlochtemperaturen</li> <li>• Moränenstände</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pflanzen- phänologische Daten</li> <li>• Weinbauliche Daten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eisbedeckung von Gewässern</li> <li>• Schneefall</li> <li>• Schneebedeckung</li> <li>• Wasserstände</li> </ul>
			Sakral	Bildhaft
			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bittprozessionen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gemälde</li> <li>• Zeichnungen</li> </ul>
		Epigraphisch	Archäologisch	
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hochwassermarken</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Funde</li> </ul>	

**Tab. 1.1.** Direkte und indirekte Zeugen (Archive) des vergangenen Klimas. Für eine ausführlichere Tabelle siehe Brönnimann et al. (2018).

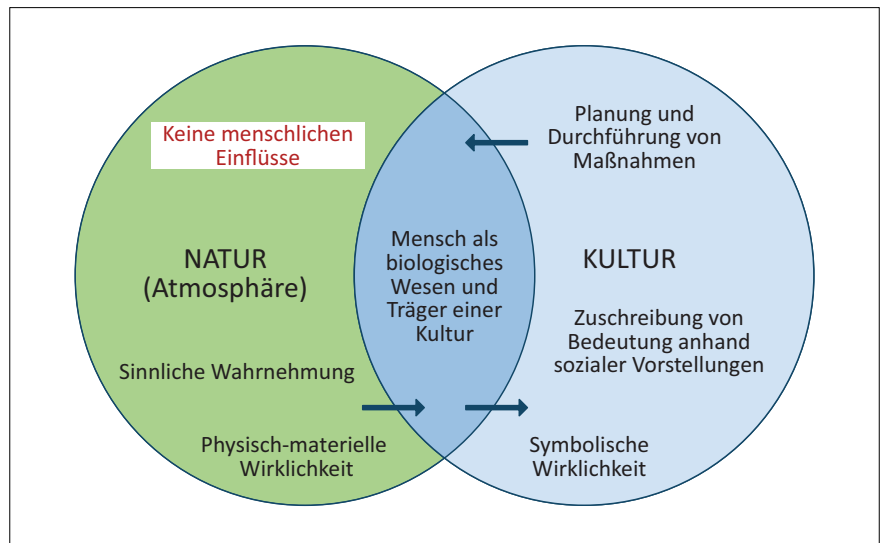
historischer Fragen auf Belege aus der Vergangenheit zurück. Im Hinblick auf die Rekonstruktion von Wetter und Klima umfassen historische Quellen sowohl Dokumente als auch Belege in der bebauten und natürlichen Umwelt. Der Begriff Dokument umfasst eine breite Vielfalt von Quellen wie persönliche Aufzeichnungen von Individuen und Akten von Behörden, gedruckte Materialien aller Art sowie Kunstwerke und elektronische Daten. Zu den Belegen in der Umwelt gehören archäologische Funde, Artefakte und Indikatoren in der bebauten Umwelt wie Gebäude oder Hochwassermarken an Gebäuden.<sup>6</sup> Narrative Belege umfassen direkte Beschreibungen von Wetter und Witterung und instrumentelle Messungen, die in Kapitel 4 vorgestellt werden. Daneben haben Behörden schon früh quantitative Daten aller Art wie den Zeitpunkt der Trauben- und Getreideernte und den Umfang der Weinrenten durch administrative Verfahren im Zusammenhang mit der Steuerkontrolle und der Zahlung von Abgaben erhoben. Solche regelmässig erhobenen Daten haben die Qualität von natürlichen Proxies, wodurch sie zu Zeitreihen zusammengefasst und zur Schätzung von Temperatur und Niederschlag verwendet werden können. Sie werden im Teilkapitel 5.3 vorgestellt. Materialien aus Archiven der Gesellschaft werden von Vertretern verschiedener Disziplinen ausgewertet. Viele von ihnen sind Geographen mit Spezialisierungen in Meteorologie und Klimatologie, während Historikerinnen die Minderheit bilden.<sup>7</sup>

Der Begriff «Klimageschichte» kann je nach der räumlich-zeitlichen Ebene, auf die er gemünzt wird, zwei verschiedene Bedeutungen haben. Die Makrogeschichte des Klimas, Paläoklimatologie genannt, zielt darauf ab, unser Verständnis der physikalischen Prozesse im Klimasystem zu vertiefen. Sie ist – einfach gesagt – die Geschichte des Klimasystems der Erde von seinen Anfängen bis zur Gegenwart. Ausgehend von Modellen der physikalischen Welt konzentrieren sich die Klimawissenschaften darauf, globale Rekonstruktionen des Klimas (zumeist Temperaturen) so weit in die Vergangenheit zurückzuschreiben wie möglich. Die gewonnenen Erkenntnisse müssen mit den Gesetzen der Physik und den damit verbundenen klimatologischen Erkenntnissen übereinstimmen. Mithilfe ausgeklügelter Statistiken gehen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler anhand der Vergangenheit natürlichen und anthropogenen Einflussfaktoren nach, die zu Variationen und Veränderungen im Klimasystem führen. Die Paläoklimaforschung konzentriert sich hauptsächlich auf die langfristige, großräumige Entwicklung vergangener Klimate. Regionale Zeitreihen werden aggregiert, um zu einer hemisphärischen oder globalen Ebene zu gelangen. Die Modellierer benötigen lange globale Temperatur- und Niederschlagsdaten, um ihre Modelle zu validieren, die letztlich Bewertungen zukünftiger Klimate in Form von längerfristigen Durchschnittswerten liefern. Dies wird im Teilkapitel 6.4 erörtert.

Historiker begannen vor etwa 50 Jahren, den Begriff «Klimageschichte» zu verwenden, um ein neuartiges Gebiet der Geschichtswissenschaft zu bezeichnen. Es untersucht, wie sich Witterung und Klima in der Vergangenheit verändert haben und wie sich diese Veränderungen auf Kultur und Wirtschaft auswirkten.<sup>8</sup> Den Historikern geht es in erster Linie darum, die Rolle von Wetter und Klima für die Entwicklung der menschlichen Vergangenheit zu verstehen. Was die Menschen damals und heute betrifft, sind kurzfristige atmosphärische Ereignisse, die sich über Wochen, Tage oder sogar Stunden



**Abb.1.3.** Witterungsbeobachtungen und ihre kulturelle Interpretation – ein Modell. Nach Peter Sieferle (1997: 37–41).



Eine Geschichte der Witterung greift vor allem auf Erzählungen zurück. Bei ihrer Interpretation gilt es zu beachten, dass kulturelle Aspekte für das jeweilige Verständnis von Witterung und Klima bedeutsam sind. Die Kultur – die sich aus sprachlichen, phonetischen und visuellen Ausdrucksformen zusammensetzt – verleiht dem Weltgeschehen, einschließlich Wetter und Klima, Bedeutung. Neben der Auseinandersetzung mit der Art und Objektivität der in den Dokumenten festgehaltenen meteorologischen Ereignisse sollten wir deshalb auch untersuchen, warum und wie sie beobachtet und aufgezeichnet wurden.

Das Modell (Abb. 1.3) stützt sich auf Überlegungen des deutschen Historikers Rolf Peter Sieferle (1949–2016).<sup>11</sup> Es visualisiert das Verhältnis von Witterungsbeobachtung und ihrer kulturellen Interpretation. Die Abbildung zeigt zwei Kreise, welche die materielle und die symbolische Welt darstellen. Der Begriff der materiellen Welt umfasst alle Elemente der physisch-materiellen Wirklichkeit außerhalb der symbolischen Wirklichkeit. Zu diesen gehören Artefakte wie Maschinen, Geräte, Werkzeuge, Netzwerke und Infrastrukturen, von denen wir für die Aufrechterhaltung unserer Lebensfunktionen abhängig sind. Ferner die belebte und unbelebte Natur, d. h. jenen Bereich der Umwelt, der sich ohne namentlichen menschlichen Einfluss entwickelt. Sieferles Kulturbegriff umfasst alle Elemente, die der symbolischen Wirklichkeit angehören. Dazu gehören alle im menschlichen Gehirn gespeicherten Informationen, ferner physische und virtuelle Informationsträger wie Bücher, Museen, Kunstwerke, Speichermedien und Server.

Der Mensch steht im Überlappungsbereich der beiden Kreise. Er ist ein biologisches Wesen und zugleich Träger einer Kultur. Als biologisches Wesen nimmt er mit seinen Sinnen die Außenwelt wahr. Als Kulturwesen schreibt er seinen Wahrnehmungen Bedeutung zu. Dabei stützt er sich auf Wissen, Werte und Überzeugungen, die durch soziale Kommunikation vermittelt werden.<sup>12</sup> Bedeutungen wurzeln in sozialen Repräsentationen der Wirklichkeit. Bei diesen handelt es sich um ein Geflecht von Wissensbeständen, Überzeu-

gungen und Werten, die dazu dienen, Orientierung zu vermitteln, eine soziale Ordnung herzustellen und die Kommunikation zwischen Mitgliedern von Gruppen und Gemeinschaften zu ermöglichen.<sup>13</sup> Zuschreibungen von Bedeutung liefern die Motivation für Handlungen, die in die materielle, auch in die quasinatürliche Umwelt, eingreifen (Abb. 1.3). Wer glaubt, dass Hagelschläge auf Gottes Zorn zurückzuführen sind, nimmt an Prozessionen teil. Wer sie einer Verschwörung von Hexen zuschreibt, ruft zur Hexenverbrennung auf. Wer versucht, Verluste zu vermeiden, schließt eine Sachversicherung ab. Zu den Hauptaufgaben der (historischen) Klimaforschung gehört es, beide Aspekte, die naturräumlichen und die kulturellen, angemessen zu berücksichtigen. Die Kultur- und Wissensgeschichte von Wetter und Klima wird in Kapitel 4 dargestellt, während gesellschaftliche Reaktionen auf den Klimawandel in Kapitel 9 am Beispiel der Hexenverfolgungen und in Kapitel 11 anhand der Diskussionen um den gegenwärtigen Klimawandel thematisiert werden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass Wissenschaftler und Klimahistorikerinnen unterschiedliche Ziele verfolgen, auf unterschiedliche Erkenntnisse zurückgreifen und unterschiedliche Methoden anwenden. Darüber hinaus sind ihre Ergebnisse auf unterschiedlichen zeitlichen und räumlichen Ebenen angesiedelt. Der prominente deutsche Soziologe und Historiker Max Weber (1864–1920) wies darauf hin, dass die Wirklichkeit zweidimensional ist, bestehend aus materiellen Fakten einerseits und Sprache, Wirklichkeitsinterpretation und kulturellen Weltbildern andererseits.<sup>14</sup> Eine zweigleisige Geschichte, die beide Perspektiven verbindet, trägt der Doppelnatur des Menschen als Natur- und Kulturwesen Rechnung.

## 1.3

### Gemeinsamkeiten

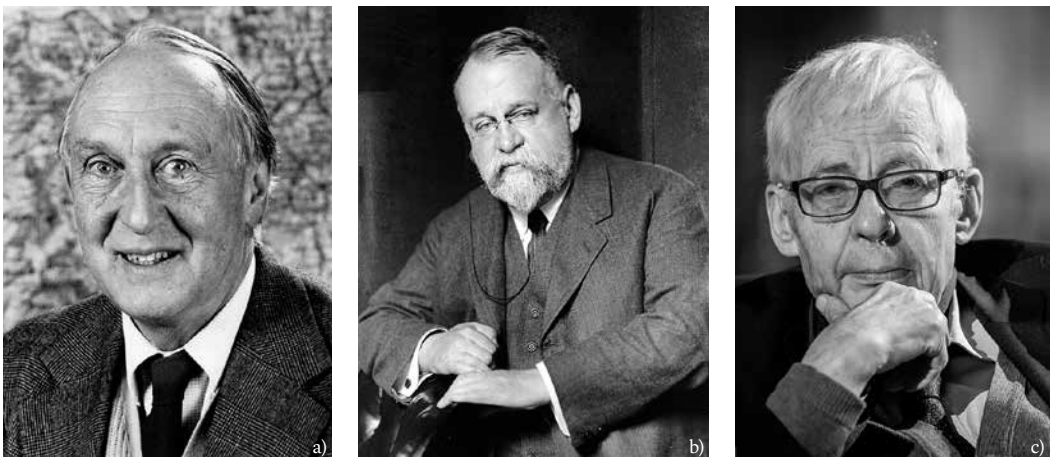
Dieser Abschnitt zeigt, wie die beiden unterschiedlichen Lösungsansätze – der klimatologische und der humangeschichtliche – zu einem gewissen Grad miteinander in Einklang gebracht werden können. Um die Veränderungen des Klimasystems mit der Geschichte der Menschen zu verbinden, hat der Erstautor dieses Buches die «Pfister-Indizes»<sup>15</sup> entwickelt, die auf Vorarbeiten des britischen Klimatologen Hubert Lamb (1913–1997; Abb. 1.4a) aufbauen. Bei den Indizes handelt es sich um eigens definierte Proxydaten, die alle verfügbaren dokumentarischen Nachweise für die Temperatur- oder Niederschlagsverhältnisse eines bestimmten Monats oder einer bestimmten Jahreszeit in einer numerischen Größe zusammenfassen. Diese kann Werte von –3 (für sehr kalt oder trocken) bis +3 (für sehr warm oder nass) annehmen. Die Bewertung 0 wird für unspektakuläre Jahreszeiten oder Monate verwendet. Das Verfahren wird im Teilkapitel 5.4 näher erläutert. Saisonale Temperaturindizes für West- und Mitteleuropa bilden zusammen mit Beschreibungen der extremsten Jahreszeiten (Kapitel 7 und 8) das quantitative Rückgrat der Klimarekonstruktion der letzten 1000 Jahre.

Eine Umweltgeschichte entstand in den USA in den 1960er-Jahren. Europa und andere Weltgegenden folgten in den 1970er-Jahren und später. Die Umweltgeschichte fragt in erster Linie danach, wie der Mensch seine quasi natürliche Umwelt verändert. Einige Historiker sind zwar immer noch der Ansicht, dass sich die Geschichte auf Ereignisse in der menschlichen Welt

beschränken sollte, aber ihre Zahl wird mit dem Generationenwandel und der steigenden Bedeutung der Umweltprobleme in der Öffentlichkeit stetig geringer. Die quasi-natürliche menschliche Umwelt wird nach Ansicht des deutschen Historikers Wolfram Siemann heute neben Politik, Wirtschaft und Kultur als vierte Grundkategorie der Geschichte betrachtet.<sup>16</sup> Die historische Klimaforschung ist ein Teilbereich der Umweltgeschichte. Sie fragt im Wesentlichen nach der Rolle des Klimas als Akteur in der Humangeschichte. Bis zu einem gewissen Grad hat die Umweltgeschichte den Weg für die Klimageschichte geebnet, aber bei weitem nicht alle, die sich mit diesem Thema befassen, können als Umwelthistorikerinnen betrachtet werden. Viele Vertreter dieses Forschungsfeldes packen ihre Arbeit auf unterschiedliche Weise an. Einige würden sich als Umwelthistoriker bezeichnen, andere als Wirtschaftshistoriker, Geographen, Klimatologen oder Physiker.<sup>17</sup>

Drei Pioniere haben Vorarbeit geleistet.<sup>18</sup> Der deutsche Geograph Eduard Brückner (1862–1927; Abb. 1.4b), Sohn eines Historikers, veröffentlichte 1890 eine bahnbrechende Monographie mit dem Titel «Klimaschwankungen seit 1700. Nebst Bemerkungen über die Klimaschwankungen der Diluvialzeit».<sup>19</sup> Er stellte sich gegen das damals herrschende Dogma, welches das Klima der vergangenen Jahrhunderte als konstant betrachtete (Teilkapitel 4.6.2), indem er quantitative Evidenz aus historischen Quellen in Form von frühen Instrumentenmessungen, Weinlesedaten und Gletscherschwankungen zusammentrug. Auf dieser Grundlage untersuchte er die sozialen und ökonomischen Auswirkungen von Witterungsextremen auf die Schwankungen der Getreideernten und Getreidepreise sowie auf Migrationsbewegungen. Doch geriet seine Arbeit in Vergessenheit, bis sie zwei deutsche Wissenschaftler, der Soziologe Nico Stehr und der Klimatologe Hans von Storch, wiederentdeckten und teilweise ins Englische übersetzten.<sup>20</sup>

Ohne Brückners deutschsprachige Publikationen zu kennen, griff der französische Historiker Emmanuel Le Roy Ladurie (geb. 1929; Abb. 1.4c) in seiner Klimageschichte seit dem Jahr 1000 auf Zeitreihen von Weinlesedaten



**Abb. 1.4.** Pioniere der paläoklimatologischen Forschung. a) Hubert H. Lamb. b) Eduard Brückner. c) Emmanuel Le Roy Ladurie (Quelle: Wikipedia).

sowie schriftliche und bildliche Belege für Gletscherschwankungen zurück, um vorinstrumentelle Schwankungen des Klimas zu rekonstruieren.<sup>21</sup> Aus Rücksicht auf seine Karriere als Historiker distanzierte er sich jedoch von der Idee, dass kurzfristige Witterungsextreme einen Einfluss auf den Lauf der Geschichte gehabt haben könnten. Erst vier Jahrzehnte später gestand er ein, er habe solche Aussagen nur gemacht, um nicht als Klimadeterminist diskreditiert zu werden.<sup>22</sup>

Der englische Klimatologe Hubert H. Lamb (Abb. 1.4a) wertete mit seinem Gespür für die Menschheitsgeschichte eine Fülle von historischen Witterungsberichten aus, die er während seiner Arbeit für den britischen Wetterdienst entdeckte. Er schuf den Begriff der mittelalterlichen Warmperiode und entdeckte die große Bedeutung von Vulkanausbrüchen für Wetter und Klima. Obwohl er wie Brückner 80 Jahre zuvor die Bedeutung des Klimas für die Menschheitsgeschichte differenziert betrachtete,<sup>23</sup> sah er sich mit dem Vorwurf des Klimadeterminismus konfrontiert.

Diskussionen über die gesellschaftliche Bedeutung von Klimavariationen wurden und werden durch den Umweltdeterminismus diskreditiert, der vom amerikanischen Geographen Ellsworth Huntington und seinen Anhängern auf die Spitze getrieben wurde. Umweltdeterministen sind überzeugt, dass Umweltfaktoren, namentlich das Klima, den Lauf der Geschichte maßgeblich geprägt haben. Dies mag ein Grund dafür sein, dass viele Historiker dazu neigen, die potenzielle Bedeutung von Wetter und Klima für die menschliche Entwicklung zu ignorieren oder herunterzuspielen. Der US-amerikanische Wirtschaftshistoriker Jan De Vries weist darauf hin, dass die Einbeziehung des Faktors Klima in das Studium der Geschichte nicht als Suche nach einer alternativen und deterministischen Erklärung der Vergangenheit betrachtet werden darf, sondern als eine Erweiterung des Umfeldes, in dem die Funktionsweise vergangener Gesellschaften zu verstehen ist.<sup>24</sup> Der offene Klimadeterminismus ist heute überwunden, aber in latenter Form besteht er weiter, nicht zuletzt in naturwissenschaftlichen Publikationen. Stehr und von Storch gehen so weit zu postulieren, dass «ein großer Teil der heutigen Klimafolgenforschung echter Klimadeterminismus ist».<sup>25</sup>

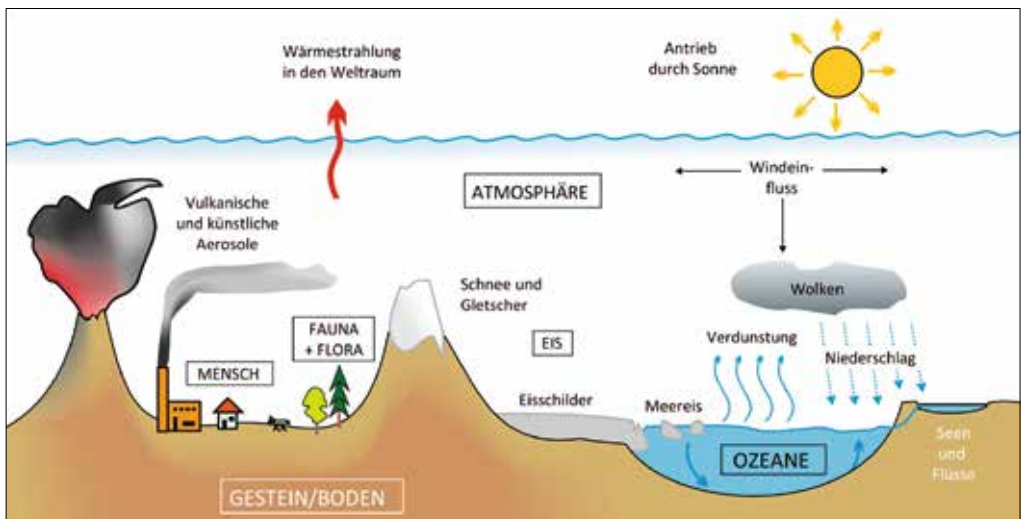
Um die Wechselwirkungen zwischen der Geschichte menschlicher Gesellschaften und der Dynamik ihrer quasinatürlichen Umwelt zu untersuchen, müssen wir uns vor Augen halten, dass viele Prozesse in beiden Bereichen eine Eigendynamik haben und weitgehend voneinander unabhängig sind. Im gesellschaftlichen Bereich gehören dazu etwa das Bevölkerungswachstum, die Wirtschaftsentwicklung, die Schaffung von Transport- und Kommunikationsnetzen, die Globalisierung, die Veränderungen institutioneller Strukturen und der Aufstieg oder der Fall von Imperien. Im Bereich der natürlichen Umwelt spielen Veränderungen eine Rolle, zu denen der Mensch beiträgt, wie die Bodenversalzung, die Entwaldung und das Absinken des Grundwasserspiegels. Dazu kommen exogene Faktoren, wie Veränderungen der Erdbahnparameter (Fig. 1.7), Schwankungen der Sonnenaktivität und große Vulkanausbrüche.<sup>26</sup>

Diese Vielschichtigkeit macht es schwierig, interdisziplinäre Untersuchungen zur Klimageschichte zu strukturieren. Jeder Ansatz muss auf geeignete Erklärungsmodelle zurückgreifen. Die Naturwissenschaften gehen von Modellen der physischen Welt aus und gehen dann zu Modellen mensch-

licher Gesellschaften über. Dabei stoßen sie auf die Tatsache, dass geschichtliche Prozesse nicht auf der gleichen Ebene verallgemeinert werden können. Historiker versuchen zu verstehen, inwieweit die Gesellschaften in ihrem wirtschaftlichen und ökologischen Umfeld durch klimatische Einflüsse verwundbar waren. Im Gegensatz zu Naturwissenschaftlern tendieren Historiker dazu, weite Verallgemeinerungen zu vermeiden, weil es Details, d. h. Unterschiede von einem Fall zum anderen sind, die für die historische Forschung von zentraler Bedeutung sind.<sup>27</sup> Der US-amerikanische Historiker John Brooke von der Ohio State University versuchte, die Entwicklung des Klimas und seine Bedeutung für die Geschichte der Menschheit langfristig und im globalen Maßstab zu dokumentieren, wobei er auch den Einfluss von Pandemien wie z. B. der Pest einbezog. Sein Buch ergänzt die Ergebnisse der vorliegenden, auf Europa beschränkten Untersuchung.<sup>28</sup>

Weitgehend umfassende Fallstudien sind ein geeigneter Weg, um die vielen räumlichen, zeitlichen und thematischen Aspekte aufzuzeigen, die bei der Untersuchung von Witterungsextremen auf vergangene Gesellschaften zu berücksichtigen sind. Dies zeigt das Beispiel der «Tambora-Krise» (Kapitel 3). Um der Vielschichtigkeit der im Laufe der Zeit wirkenden Triebkräfte Rechnung zu tragen, ist in Kapitel 9 der Ausgangspunkt der Untersuchung vom Klima auf die Bevölkerung verlagert worden. Der Wechsel zwischen verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalen stellt eine weitere Herausforderung dar, sei es der Wechsel von lokal zu global oder der Zusammenhang zwischen kurzfristigen Ereignissen und längerfristigen Schwankungen.

In einem ersten Schritt werden, ausgehend vom Schema des Klimasystems (Abb. 1.5), die Grundprinzipien vorgestellt, welche die globale Klimadynamik bestimmen. Die Konsequenzen für das europäische Klima werden in den Kapiteln 6 bis 8, 10 und 11 dargestellt.



**Abb. 1.5.** Klimasystem der Erde. Die Teilsysteme sind in Rechtecken dargestellt. Wichtige Prozesse oder Phänomene sind zusätzlich aufgelistet.



Das Klimasystem wird durch die Strahlungsleistung der Sonne angetrieben. Es besteht aus sechs Teilsystemen, welche in einem gegenseitigen Austausch stehen. Bezogen auf den Energieaustausch ist es gegenüber dem Weltraum offen, bezogen auf die Massenflüsse (z. B. jene des Wassers) ist es nahezu geschlossen.<sup>29</sup>

1. *Atmosphäre*: Die Atmosphäre ist ein dünner, relativ gleichmäßig verteilter gasförmiger Film mit einer geringen vertikalen Ausdehnung (99 % der Masse ist unter 30 km konzentriert). In diesem unteren Bereich findet das Wetter mit seinen charakteristischen Prozessen wie Strahlung, Wolkenbildung, Niederschlag, Luftströmung, Wärme- und Feuchtigkeitstransport, Speicherung natürlicher und anthropogener Spurengase usw. statt. Man unterscheidet deshalb zwischen der wetterrelevanten Schicht der Troposphäre (in den untersten 10 bis 15 km) und der Stratosphäre (in Höhen von 15 bis 50 km), die im Zusammenhang mit Vulkanausbrüchen eine bedeutende Rolle spielt. Vulkanische und anthropogene Aerosole sowie Treibhausgase werden von der Atmosphäre aufgenommen.

2. *Hydrosphäre*: Die Hydrosphäre besteht fast ausschließlich aus Wasser in flüssiger Form. Sie umfasst die großen Meeresgebiete, die mehr als zwei Drittel der Erdoberfläche bedecken, sowie die kontinentalen Gebiete mit Seen, Flüssen und unterirdischen Gewässern. Zu den wichtigsten Prozessen im Hydrosystem gehören die Ozeanzirkulation (einschließlich Wärme- und Massentransport), der Abfluss im Bereich der Flüsse sowie die Verdunstung von Wasser.

3. *Kryosphäre*: Die Kryosphäre umfasst alle Arten von Schnee und Eis auf der Erdoberfläche wie die großen Eisschilde, welche die Antarktis und Grönland bedecken, das arktische und antarktische Meereis sowie alle kontinentalen Gletscher, Schnee- und Eisfelder und den Permafrost. Damit stellt sie eine langfristige Wasserreserve dar und reagiert auf Veränderungen des Strahlungshaushaltes. Gefrorenes Wasser macht etwa 2 % des Weltwassers aus. In kritischen Regionen der Erde kann die Eisschmelze den Salzgehalt der Ozeane erheblich beeinflussen und zum Anstieg des Meeresspiegels beitragen.

4. *Lithosphäre/Landoberflächen*: Die Lithosphäre besteht aus festen Bestandteilen (aus festem Gestein und dem aufliegenden Boden). Ihre komplexe Topographie beeinflusst die atmosphärischen und ozeanischen Zirkulationssysteme. Wie die Atmosphäre und die Ozeane absorbiert sie die kurzweilige Strahlung und gibt diese als Wärmestrahlung wieder ab. Sie speichert und verdunstet Wasser und bildet ein großes Reservoir für Staub und alle Arten von Partikeln, die über weite Strecken transportiert werden können.

5. *Die Biosphäre*: Die Biosphäre enthält die terrestrische Vegetation, die kontinentale Flora und Fauna sowie die Flora und Fauna der Ozeane. Sie spielt beim Kohlenstoffaustausch zwischen verschiedenen Reservoiren (z. B. CO<sub>2</sub>-Austausch mit der Atmosphäre) eine bedeutende Rolle, beeinflusst den Wärme-

und Strahlungshaushalt und verändert wichtige physikalische Parameter wie die Oberflächenrauigkeit, die Albedo,<sup>30</sup> die Verdunstung, den Abfluss sowie die Feldkapazität des Bodens.<sup>31</sup>

*6. Anthroposphäre:* In einigen Lehrbüchern wird die Anthroposphäre nicht als Teil des Klimasystems eingestuft, indem der Mensch als externer, störender Faktor des Klimasystems bezeichnet wird. Im Allgemeinen sind menschliche Aktivitäten verantwortlich für die Emission verschiedener Stoffe, welche die physikalischen und biologischen Eigenschaften der anderen Sphären der Erde verändern, sowie für Landnutzungsänderungen, die zu Wüstenbildung und Bodendegradation führen.

Das Klimasystem wird normalerweise durch Variablen wie Temperatur, Luftdruck, Feuchtigkeit, Energie, Dichte, Salzgehalt, Kräfte und Geschwindigkeiten charakterisiert. Wenn wir Klimaprozesse verstehen oder modellieren wollen, müssen wir uns bewusst sein, dass die Zeit- und Längenskalen ausgewählter Prozesse, die innerhalb der verschiedenen Komponenten des Klimasystems ablaufen, sehr unterschiedlich sind. Deshalb ist es anspruchsvoll, Klimaprozesse im Detail zu verstehen. Eine Reihe von Transport- und Austauschprozessen, die für die globale Strahlungs- und Energiebilanz sowie den Wärme- und Massenhaushalt wichtig sind, wird in Abbildung 1.5 dargestellt. Die Menge der gegen den Erdboden einfallenden kurzwelligen solaren Strahlungsenergie steht langfristig im Gleichgewicht mit der langwellig ausgestrahlten (Wärme-)Energie. Temperaturunterschiede zwischen verschiedenen Regionen äußern sich in Unterschieden des Luftdrucks, die wiederum durch unterschiedliche Windsysteme ausgeglichen werden. Strömungsdynamik und Wärme sind weitere wichtige Determinanten des Wasserkreislaufs. Wolken können innerhalb von Minuten entstehen, während sich große kontinentale Eisschilde über Tausende von Jahren bilden. Wichtige Zirkulations-, Transport- und Austauschprozesse werden in Kapitel 2 ausführlicher beschrieben.

«Wetter» bezeichnet den Zustand der Atmosphäre und aller damit verbundenen Prozesse an einem bestimmten Ort oder in einer kleinen Region während eines kurzen Zeitraums, in der Regel von einem Tag. Die grundlegenden meteorologischen Messungen werden vor allem in den untersten Metern der Atmosphäre durchgeführt. Die klassische Wetterschicht umfasst jedoch etwa 8 km in Polarregionen und 17 km in tropischen Gebieten. Wie bereits erwähnt wird sie als Troposphäre bezeichnet. In ihr treten Erscheinungen wie Stürme, Wolken, Gewitter und Starkniederschläge (einschließlich Schneefall) auf. An ihrer Obergrenze wird die Troposphäre durch die Tropopause begrenzt, eine Übergangsschicht, die als quasistabile Grenze fungiert. Als klassische Wetterschicht enthält die Troposphäre 90 % der gesamten Luftmasse und fast 100 % des Wasserdampfs. Viele Prozesse sind sogar auf eine kleine Schicht über der Erdoberfläche mit einer vertikalen Ausdehnung von einigen Hundert Metern oder einem Kilometer begrenzt.

Das «Klima» ist eigentlich die Statistik des Wetters. Es wird charakterisiert durch tägliche, monatliche und jahreszeitliche Klimavariablen, die über eine Reihe von Jahrzehnten gemessen werden. Nach Angaben der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) beträgt die Standard-Klimaperiode

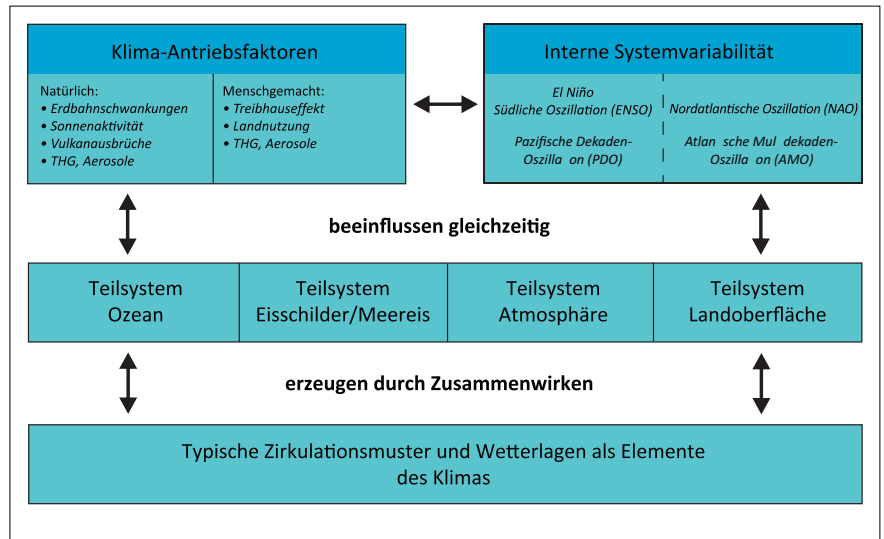
30 Jahre. Im variablen Klima der höheren Breiten müssen die Perioden verlängert werden, wenn ihre Statistik signifikant sein soll. Die Idee des Klimas als Erwartungsgröße ist in unserer Vorstellung verankert. Entsprechend besagt das Sprichwort: «Klima ist das, was man erwartet, Wetter ist das, was man bekommt.»

In der englischen Sprache gibt es keinen Begriff für großräumige Wetterphänomene, die mehrere Tage andauern (in deutscher Sprache als «Witterung» bezeichnet). Stattdessen werden Begriffe wie Wetterschwankungen, typische Wettermuster oder einfach Wetter und Klima verwendet. Indem man sich auf die kürzere Wetterzeitspanne von Stunden bis Tagen konzentriert, kann die Atmosphäre als eine einzige, geschlossene Systemkomponente behandelt werden. Das bedeutet, dass wir den Einfluss von Langzeit-Gedächtniseffekten der anderen Systemkomponenten oder Sphären, die in Abbildung 1.5 dargestellt sind (z. B. der Wärmehalt des Ozeans oder das Meereis), bei der Wetterprognose vernachlässigen können. Für Klimastudien, die längere Zeiträume umfassen, ist jedoch das Zusammenspiel fast aller Komponenten in der Abbildung zu beachten.

Abbildung 1.6 stellt das Wirkungsgefüge der verschiedenen Antriebsfaktoren oder Forcings dar. Zusammen mit der internen Systemvariabilität beeinflussen sie die Teilsysteme des Klimasystems und erzeugen dabei typische Zirkulationsmuster. Der wichtigste natürliche Antriebsfaktor auf der 100-jährigen bis 1000-jährigen Zeitskala (siehe Kasten oben links in Abb. 1.6) wird als orbitaler Antrieb (oder Forcing) bezeichnet. Die Erdbewegung im Weltraum führt zu mehr oder weniger zyklischen, globalen und regionalen Veränderungen der Sonneneinstrahlung mit einer Zeitskala von Tausenden von Jahren (für weitere Einzelheiten siehe Kapitel 2). Auch die Sonnenaktivität oder Sonneneinstrahlung ändert sich als Folge von Zyklen, namentlich des 11-jährigen Sonnenfleckenzyklus sowie weiteren 85, 210 oder 1470 Jahre langen oder längeren Zyklen. Vulkanische Eruptionen lösen eigentliche Schocks im Klimasystem aus. Die hohen Mengen an Aerosolen, welche explosionsartig in die höhere Atmosphäre ausgestoßen werden, senken die Oberflächentemperatur der Erde und erzeugen Veränderungen der atmosphärischen Zirkulation sowie der Niederschlagsverteilung (Teilkapitel 3.3). Änderungen der Treibhausgas- oder Aerosolkonzentration führen zu Veränderungen der Strahlung, der Temperatur und der Zirkulation in Atmosphäre und Ozean. Die zunehmende Konzentration von Treibhausgasen wie Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ), Methan ( $\text{CH}_4$ ) und Distickstoffoxid ( $\text{N}_2\text{O}$ ) ist hauptsächlich für die globalen Klimaveränderungen der letzten 100 Jahre verantwortlich.

Der Kasten oben rechts in Abbildung 1.6 zeigt zwei wichtige Phänomene, die durch interne Variabilität innerhalb des Klimasystems hervorgerufen werden. Ihre Existenz ist hauptsächlich auf die komplexe Wechselwirkung zwischen Ozean und Atmosphäre zurückzuführen. Das wichtigste Phänomen wird als El Niño Southern Oscillation (ENSO) bezeichnet. Es handelt sich dabei um eine periodische west-östlich orientierte Oszillation des Luftdrucks und der Zirkulation im Ozean sowie in der Atmosphäre des äquatorialen Pazifiks (Abb. 1.17). Das europäische Pendant zu El Niño, die Nordatlantische Oszillation (NAO), charakterisiert eine Oszillation des Luftdrucks und der Meereisverteilung im nordatlantischen Raum, die vor allem in den Wintermonaten wirksam ist (Abb. 1.17 und 1.18).

**Abb. 1.6.** Wirkungsgefüge der wichtigsten Faktoren und Prozesse, welche Wetter und Klima beeinflussen.



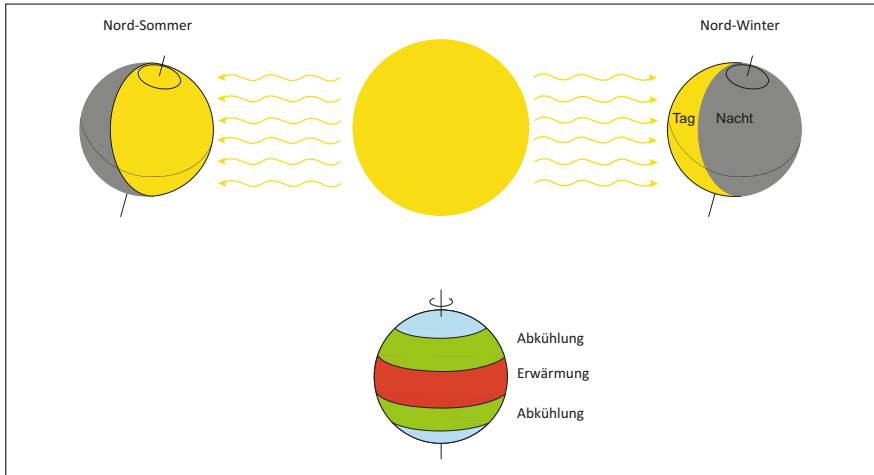
Wie in Abb. 1.6 gezeigt wird, beeinflussen die Antriebsfaktoren und die interne Systemvariabilität alle vier Subsysteme des Klimasystems. Die Kombination ihrer Wirkungen ändert sich jeden Tag, jede Woche, jeden Monat, jede Jahreszeit, jedes Jahr, jedes Jahrzehnt, jedes Jahrhundert, jedes Jahrtausend usw. Das Zusammenspiel all dieser Subsysteme erzeugt die charakteristischen Zirkulationsmuster, die wiederum mittlere und extreme Witterungsverläufe auf lokaler und regionaler Ebene erzeugen. Daher ist das Klima, ob auf lokaler, regionaler oder globaler Ebene, stets das Ergebnis aller antreibenden Faktoren und der internen Systemeffekte, welche die Dynamik der Witterung über einen langen Zeitraum bestimmen.

## 1.5

### Die globale Energiebilanz – treibende Kraft des Klimasystems

Das globale Energiesystem wird von der Sonne angetrieben (Abb. 1.7). Die durchschnittliche einfallende kurzwellige Netto-Einstrahlung der Sonne beträgt 340 Watt pro Quadratmeter ( $W/m^2$ ). Über einen längeren Zeitraum muss dieser Energieeintrag durch den Betrag der von der Erde in den Weltraum abgestrahlten Wärmeenergie ausgeglichen werden. Ist dies nicht der Fall, unterliegt die Durchschnittstemperatur der Erde grob gesagt einer positiven oder negativen Drift. Ohne Atmosphäre (und damit ohne Treibhauseffekt) läge die globale Durchschnittstemperatur in Oberflächennähe bei etwa  $-18^\circ C$ . Organismen können deshalb nur aufgrund der wichtigen Treibhausgase in der Erdatmosphäre überleben, die langwellige Strahlung absorbieren und wiederum an die Erdoberfläche zurückstrahlen. Das wichtigste natürliche Treibhausgas ist Wasserdampf ( $H_2O$ ). Aufgrund des gesamten Treibhauseffektes beträgt die Durchschnittstemperatur auf der Erde zirka  $15^\circ C$  und nicht  $-18^\circ C$ , wie dies ohne die Erdatmosphäre der Fall wäre. Ausgelöst durch anthropogene Aktivitäten werden zusätzlich mehrere Treibhausgase wie Kohlendioxid ( $CO_2$ ), Methan ( $CH_4$ ), Distickstoffoxid ( $N_2O$ ) oder

**Abb. 1.7.** Der solare Antrieb des Klimasystems. Aufgrund des sich ändernden Winkels der einfallenden Sonnenstrahlung entsteht in den Tropen ein Energieüberschuss und an den Polen ein Energiedefizit (größere Abbildung oben). Aufgrund der Schrägstellung der Erdachse ist dieser Energieverlust in der entsprechenden Winterhemisphäre extrem groß, was zu einem erheblichen Energiegefälle führt (siehe kleinere Abbildung unten).



Lachgas, Ozon ( $O_3$ ) und Fluorchlorkohlenwasserstoff (FCKW) erzeugt, welche die globale Durchschnittstemperatur erhöhen.

Der obere Teil von Abbildung 1.7 zeigt die Richtung der einfallenden kurzwelligigen Strahlung der Sonne während des nordhemisphärischen Sommers (links) und Winters (rechts). Aufgrund der höheren Position der Sonne erhalten die Tropen die höchste Energiemenge. Zusätzlich wird die Sonnenenergie durch die Neigung der Erdachse moduliert, was im Winter auf beiden Hemisphären Polarnächte verursacht. Die untere schematische Darstellung stellt dar, dass die Erde in den Tropen große Energiemengen gewinnt und in beiden Polarregionen Energie verliert. Wenn dieser starke Unterschied im Energiehaushalt nicht ausgeglichen würde, wären viele Gebiete des Planeten unbewohnbar. Glücklicherweise wird dieser Energieunterschied zwischen den Tropen und den Polarregionen durch die Transportprozesse im Ozean und in der Atmosphäre ausgeglichen.<sup>32</sup> Im Vergleich zur Atmosphäre ist der Energietransport zwischen Äquator und Pol durch den Ozean besonders in der äquatorialen Region von Bedeutung. Außerhalb der Tropen dominiert der Austausch durch die Atmosphäre.

Zusätzlich zum Wärmetransport wird Masse – in Form von Luft, Wasser oder Wasserdampf, Aerosolen und Salz – durch die Zirkulationsprozesse in der Atmosphäre und im Ozean transportiert. Europa befindet sich in der Übergangszone zwischen warmen subtropischen und kühleren polaren Luftmassen. Daher sind das europäische Wetter und Klima sehr variabel (siehe Kapitel 6 bis 8 und 10).

## 1.6

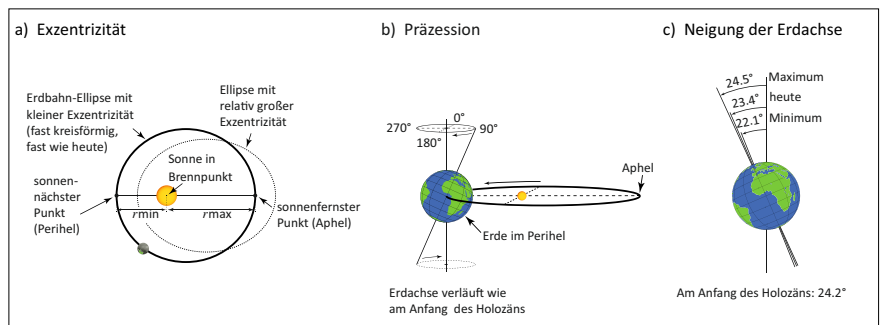
# Wodurch wurden die Energie- und Temperaturschwankungen im Holozän bestimmt?

Die Umlaufbahn der Erde um die Sonne wird von der Schwerkraft anderer Planeten beeinflusst. Wie bereits im vorigen Abschnitt angedeutet bilden die

Schwankungen der Sonneneinstrahlung infolge der Veränderungen der Bahn-  
bewegung der Erde die Grundlage für die langfristigen Schwankungen, die  
während des Holozäns auftraten. Der Begriff Holozän bezeichnet die Warm-  
zeit oder Zwischeneiszeit, die vor etwa 11'700 Jahren nach dem Ende der letz-  
ten Eiszeit begann. Abbildung 1.8 zeigt die drei Elemente der Erdbewegung,  
welche die Grundlage für die Sonneneinstrahlung, den regionalen Energie-  
haushalt und die Temperatur der Erde bilden. Sie werden in der Fachsprache  
als Milanković-Forcing oder -Antrieb bezeichnet, weil ihr physikalischer Hin-  
tergrund erstmals vom serbischen Geophysiker Milutin Milanković (1879-  
1958) beschrieben wurde.

Das erste Element, die Exzentrizität (Abb. 1.8a), bezeichnet die Verände-  
rungen der leicht elliptischen Bahn der Erde während ihres jährlichen Umlaufs  
um die Sonne, auch Revolution genannt. Die Erde ist um den 3. Januar der  
Sonne am nächsten (genannt Perihel) und um den 5. Juli am weitesten entfernt  
von ihr (genannt Aphel). Infolgedessen erhält die Erde Anfang Januar/Anfang  
Juli etwa 3,5 % mehr/weniger Strahlungsenergie. Die Schwankungen dieser  
orbitalen Exzentrizität sind quasiperiodisch mit einer durchschnittlichen Peri-  
odenlänge von etwa 100'000 Jahren. Das zweite Element der Erdbahn- oder  
Orbitalbewegung, die so genannte axiale Neigung (Abb. 1.8c), beschreibt die  
Änderung des Neigungswinkels der Erde zwischen etwa 22,1° und 24,5°. Ihre  
Periodizität beträgt zirka 41'000 Jahre. Zu Beginn des Holozäns betrug der  
Winkel etwa 24,2°, heute beträgt er 23,4°. Dies bedeutet, dass die nördliche  
Hemisphäre im Sommer viel weniger Sonnenenergie erhält als vor 10'000 Jah-  
ren. Das dritte Element der Orbitalbewegung (Abb. 1.8b) wird als Präzession  
bezeichnet. Es ist durch ein Taumeln der Erdachse wie bei einem Kreisel ge-  
kennzeichnet und folgt einer Periode von etwa 23'000 Jahren. Der Einfluss der  
Präzession war wesentlich für die Beendigung der letzten Eiszeit verantwort-  
lich, die vor etwa 115'000 Jahren begonnen hatte.

Die Berechnung der Sonneneinstrahlung für jeden Punkt auf unserem  
Globus muss alle drei Prozesse der Bahnbewegung berücksichtigen. In Abbil-  
dung 1.9 sind die Ergebnisse der Berechnungen für das gesamte Holozän dar-  
gestellt. Der langfristige Mittelwert der bodennahen Lufttemperatur ist mehr  
oder weniger das Ergebnis des Einflusses dieser Orbitalbewegungen. Abbil-



**Abb. 1.8.** Die drei klassischen quasiperiodischen Mechanismen der Erdbewegung erzeugen raumzeitliche Veränderungen der Sonneneinstrahlung (sogenanntes Milanković-Forcing). a) Änderung der elliptischen Bahn der Erde um die Sonne. b) Kreiselbewegung der Erdachse, Präzession genannt. c) Neigung der Erdachse.