

# Klimakonstruktionen

## Von der klassischen Klimatologie zur Klimaforschung

Matthias Heymann

---

Constructing Climate. From Classical Climatology to Modern Climate Research

Both climate researchers and historians of climate science have conceived climate as a stable and well defined category. This article argues that such a conception is flawed. In the course of the 19th and 20th century the very concept of climate changed considerably. Scientists came up with different definitions and concepts of climate, which implied different understandings, interests, and research approaches. Understanding climate shifted from a timeless, spatial concept at the end of the 19th century to a spaceless, temporal concept at the end of the 20th. Climatologists in the 19th and early 20th centuries considered climate as a set of atmospheric characteristics associated with specific places or regions. In this context, while the weather was subject to change, climate remained largely stable. Of particular interest was the impact of climate on human beings and the environment. In modern climate research at the close of the 20th century, the concept of climate lost its temporal stability. Instead, climate change has become a core feature of the understanding of climate and a focus of research interests. Climate has also lost its immediate association with specific geographical places and become global. The interest is now focused on the impact of human beings on climate. The paper attempts to investigate these conceptual shifts and their origins and impacts in order to provide a more comprehensive perspective on the history of climate research.

---

**Keywords:** climatology, climate research, meteorology, computer simulation, climate change

---

**Schlüsselwörter:** Klimatologie, Klimaforschung, Meteorologie, Computersimulation, Klimawandel

---

In den vergangenen Jahren ist das Interesse an der Geschichte der modernen Klimawissenschaften deutlich gestiegen. Im Vordergrund stand dabei die Geschichte der Erforschung des Klimawandels.<sup>1</sup> Infolge dieses Interesses beschränken sich die meisten Forscher in ihren Beiträgen weitgehend auf die zweite Hälfte des 20. Jahrhunderts. Die Klimaforschung des 19. und frühen 20. Jahrhunderts findet in dieser Literatur nur insoweit Berücksichtigung, als sie sich mit dem Problem des Klimawandels befasste (Fleming 1998: 2007). Durch diese Perspektive gerät der größte Teil der Aktivitäten zur Erforschung des Klimas vor 1950 jedoch aus dem Blick. Erst die Berücksichtigung dieser Perspektive macht aber deutlich, dass sich nicht nur die Klimaforschung, sondern auch die Verständnisse von Klima im Verlauf des 19. und 20. Jahrhunderts deutlich verändert haben.

Auf den ersten Blick erscheint der Klimabegriff hinreichend geklärt und stabil. Wissenschaftler greifen seit den klimatologischen Arbeiten von Alexander von Humboldt in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts auf anerkannte Definitionen zurück und haben eine präzise Vorstellung davon, was sie mit diesem Begriff benennen. Nach der heute allgemein anerkannten Definition versteht man unter Klima das „mittlere Wetter“, das heißt die statistische Beschreibung der Mittelwerte und der Variabilität von Größen, die das Wetter beschreiben, wie zum Beispiel Temperatur, Luftdruck, Niederschlag. Der „klassische Zeitraum“ für die Mittelung dieser Größen ist 1935 von der *International Meteorological Organization*, dem Vorläufer der *World Meteorological Organization*, auf dreißig Jahre festgelegt worden (Lamb 1994 [1982]: 22f., 26, Rudloff 1967: 69, IPCC 2007a: 942).

Trotz der Stabilität und langfristigen Gültigkeit gängiger Klimadefinitionen im 19. und 20. Jahrhundert hat sich das Verständnis von Klima vom frühen 19. bis zum späten 20. Jahrhundert deutlich verändert. Einerseits sind verschiedene, geringfügig voneinander abweichende Definitionen entwickelt worden. Andererseits waren diese Definitionen mit unterschiedlichen Vorstellungen, Bedeutungen und Interessen verknüpft. Wissenschaftler haben durch unterschiedliche Begriffsprägungen verschiedene Verständnisse und Bilder von Klima konstruiert. Die Bedeutungsverschiebungen dieses Begriffs, die unterschiedlichen Klimakonstruktionen, wie man sie nennen kann, haben ihrerseits Fragestellungen und Forschungsperspektiven geprägt beziehungsweise sind von diesen geprägt worden. Äußerlich erkennbar sind Verschiebungen des Klimaverständnisses an den Bezeichnungen der für die Erforschung des Klimas zuständigen Disziplinen. In der Mitte des 19. Jahrhunderts hatte sich der Begriff Klimatologie etabliert. In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts entstand der Begriff der Klimaforschung, der neue Auffassungen und Erkenntnisinteressen spiegelte.

In diesem Beitrag werden die Veränderungen der fachwissenschaftlichen Klimaverständnisse und ihr Zusammenhang mit Forschungsinteressen und Forschungsperspektiven von der Mitte des 19. Jahrhunderts bis zum Ende des 20. Jahrhunderts analysiert. Dabei unterscheide ich drei Phasen der Entwicklung, die ich als klassische Klimatologie, moderne Klimatologie und Klimaforschung bezeichne. Im Verlauf dieser Phasen – so die These – hat sich der Klimabegriff der Tendenz nach von einem zeitlosen, räumlichen Begriff zu einem zunehmend raumlosen, zeitlichen Begriff verschoben. Diese Verschiebungen resultierten aus einer Wechselwirkung von technischen und wissenschaftlichen Innovationen wie Flugverkehr und dynamische Meteorologie oder Computertechnik und Klimasimulation. Der Aufsatz gibt einen Überblick über Beiträge und Entwicklungen in der Klimatologie und der Klimaforschung, die besonders einflussreich und begriffsprägend waren, ohne einen Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben. Der Schwerpunkt der Darstellung liegt auf Beiträgen aus dem deutschsprachigen Raum, Skandi-

navien und den USA. Beiträge zur Klimatologie aus Ländern wie Russland, Großbritannien oder Japan bleiben weitgehend unerwähnt.<sup>2</sup>

## Zum Klimaverständnis und Forschungsprogramm der klassischen Klimatologie

Bereits im antiken Griechenland haben sich Philosophen wie Anaxagoras, Empedokles und vor allem Aristoteles über Fragen des Klimas ausgelassen (Frisinger 1973, Janković 2000: 16–22). Das Wort Klima stammt von dem altgriechischen Verb „κλίνειν“ (klinein, deutsch: neigen) und beschrieb ursprünglich die Neigung der Sonne zur Erdoberfläche (Miller 2005: 283). Eine systematische Erforschung des Klimas setzte jedoch erst im 19. Jahrhundert ein. Meist wird Alexander von Humboldt als einer der ersten Wegbereiter einer wissenschaftlichen Klimatologie genannt (zum Beispiel Flohn 1954 [1942]: 11, Blüthgen 1964: 1, 9, Wege 2002: 17). Humboldt war einer der ersten, der die Aufgaben einer Klimatologie, wie er sie selbst nannte, klar umriss und grundlegende klimatologische Forschungsarbeiten vorlegte (etwa Körber 1959a, b, Bernhardt 1984). Er prägte einen ganzheitlich-synthetischen Klimabegriff. Danach bezeichnete der Ausdruck Klima „alle Veränderungen der Atmosphäre, die unsre Organe merklich affizieren“ (Humboldt 1845: 340). Humboldts Klimadefinition galt im 19. Jahrhundert als Maßstab für das Verständnis und die Erforschung des Klimas (Hann 1908: 4).<sup>3</sup>

Wichtig an Humboldts Klimaverständnis waren vor allem zwei Aspekte. Erstens habe der Begriff des Klimas nur einen Sinn, wenn er einem geographischen Ort zugeordnet werde. Umgekehrt bestimmten geographische Eigenschaften des Ortes das Klima. Zweitens stellte Humboldt eine direkte Beziehung des Klimas zum Menschen her. Die Aspekte oder Elemente, die das Klima ausmachten, würden sich dadurch auszeichnen, dass sie eine Wirkung auf die Sinne des Menschen ausübten. Was für den Menschen nicht erfahrbar ist, zum Beispiel die Windgeschwindigkeit in drei Kilometer Höhe, zählte nach Humboldts Definition auch nicht zum Klima.

Humboldts Klimabegriff umfasste alle Aspekte des Klimas, die den Sinnen des Menschen zugänglich sind (Bernhardt 1984, Hantel 2001: 313f.). Es ging ihm nicht um die isolierte Beschreibung einzelner physikalischer Größen, sondern um die Erfassung einer Gesamtheit wirksamer Faktoren und deren gegenseitige Abhängigkeit. Diese Faktoren ließen sich im besten Fall durch quantitative Größen darstellen. Eine mathematische Beschreibung der Zusammenhänge der Klimaelemente und eine Vorausberechnung des Klimas hielt er wegen der Vielzahl der miteinander zusammenhängenden Erscheinungen in der Atmosphäre für unmöglich (Humboldt 1845: 364, siehe auch Bernhardt 2003: 21, Knobloch 2004: 12).

Damit begründete Humboldt eine quantitativ-beschreibende Form der Klimatologie, deren Vertreter sich auf das Beobachten und Sammeln von meteorologischen Daten bezogen auf geographische Orte und Regionen konzentrierte und Zusammenhänge qualitativ zu erfassen versuchten. Die Grundlage für diese klimatologische Arbeit schufen die seit Mitte des 19. Jahrhunderts entstehenden meteorologischen Dienste und ihre rasch steigende Anzahl von Messstationen und Messinstrumenten.<sup>4</sup> Auf Basis des wachsenden Beobachtungsnetzes erschienen seit Mitte des 19. Jahrhunderts die ersten täglichen Wetterkarten, wie 1849 in Großbritannien, 1857 in den USA, 1863 in Frankreich und 1865 in Österreich (Fleming 1990: 141–145, Hammerl 2001: 54).

Trotz der verwickelten Zusammenhänge des Wettergeschehens bemühten sich die Wetterdienste auch um eine Vorhersage, die sie aus den Daten und Erkenntnissen über das aktuelle Wetter abzuleiten versuchten. Zwei Entwicklungen beförderten diese Bemühungen erheblich: die Standardisierung der Datenerfassung zunächst auf nationaler und seit 1872 auch auf internationaler Ebene, und die Einführung der Telegraphie, die eine deutlich schnellere Übermittlung der Wetterdaten von den zerstreut und weit voneinander entfernt liegenden Stationen ermöglichte (Fleming 1990: 117–122, 141–162, Naylor 2006, Wege 2002: 19). In den USA, Frankreich, Belgien und Großbritannien begannen Wetterdienste in den 1850er Jahren telegraphische Netzwerke für die Wettervorhersage zu nutzen (Fleming 1990: 141–143, Anderson 2005: 2).

Die sich rasch ausweitenden Datensammlungen wurden zur Grundlage der Klimatologie als einer wissenschaftlichen Disziplin. Als ihr Begründer wird meist der dritte Direktor der Wiener Zentralanstalt für Meteorologie und Erdmagnetismus Julius Ferdinand Hann angesehen (Flohn 1936b: 337, Hammerl 2001: 62–72). Hann trug die Erkenntnisse und Methoden seiner Disziplin in einem umfangreichen *Handbuch der Klimatologie* zusammen, das er 1883 veröffentlichte (Hann 1883). Darin entwickelte er zunächst eine „Allgemeine Klimatologie“, in der er die grundlegenden meteorologischen Größen, die sogenannten Klimaelemente wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Winde und Luftzusammensetzung beschrieb. In weiteren Abschnitten behandelte er die einfallende Sonnenstrahlung und die diffuse Himmelsstrahlung, welche die Grundlage für die Erwärmung der Atmosphäre und für Prozesse des Wärmeaustauschs, also für die verschiedenen Klimate der Erde bildeten. Abschließend ging Hann auf Spezialklimate wie Land- und Seeklima oder Höhenklima ein, die maßgeblich durch die Eigenschaften und Oberflächen der Landschaft geprägt wurden.

Hann war der durch Humboldt begründeten Tradition sorgfältiger und naturgetreuer Beobachtung verpflichtet. Wichtiger als die Abstraktion oder Konzentration auf einzelne Klimaelemente war auch ihm die Vollständigkeit der Erkenntnisse. In der dritten Auflage seines Werks aus dem Jahr 1908 be-

richtete er über den Vorwurf, dass seine Darstellung des Tropenklimas in der vorangegangenen Ausgabe seines Werks „zu schematisch“ geraten sei. Einen solchen Schematismus, der Details unterschiedlicher Klimate verwischt, wolle er in der neuen Auflage ausdrücklich vermeiden, indem er „auf das Detail eingehende, naturgetreue Schilderungen des Klimas einzelner Örtlichkeiten und Länder“ berücksichtige (Hann 1908: vii).

Grundlegende Bedeutung für die wissenschaftliche Klimatologie hatte die Definition des Begriffs Klima, die Hann in seinem Werk lieferte. Unter Klima verstand er „die Gesamtheit der meteorologischen Erscheinungen, die den mittleren Zustand der Atmosphäre an irgend einer Stelle der Erdoberfläche kennzeichnen“ (ebd.: 1f.). Hann folgte dem Klimabegriff von Humboldt weitgehend, machte aber eine wichtige methodische Ergänzung. Den „mittleren Zustand der Atmosphäre“ beschrieb er in Form der Bildung statistischer Mittelwerte der in Messreihen erfassten meteorologischen Größen. Hanns Variante der Klimatologie wurde deshalb später als „Mittelwertsklimatologie“ bezeichnet. Der damit verknüpfte Klimabegriff implizierte einen statischen Charakter des Klimas, nämlich das über einen längeren Zeitraum Konstante (Flohn 1954 [1942]: 12).

Hann grenzte insbesondere die Klimatologie von der Nachbarwissenschaft der Meteorologie ab. Während die Meteorologie theoretisierend und zergliedernd arbeite, um „die einzelnen atmosphärischen Erscheinungen auf bekannte physikalische Gesetze zurückzuführen“, sei die Klimatologie „ihrer Natur nach mehr beschreibend“ und habe die Aufgabe, „ein möglichst lebendiges Bild des Zusammenwirkens aller atmosphärischen Erscheinungen über einer Erdstelle zu liefern“ (Hann 1908: 3). Schließlich untersuche die Klimatologie vor allem jene Erscheinungen, „die auf das organische Leben auf der Erde den größten Einfluß nehmen.“ Auch Hann betonte somit wie vor ihm Humboldt den direkten Bezug des Klimabegriffs zum Menschen und zu anderen Lebewesen (ebd.: 4).

Bei der Beschreibung der Klimate einzelner Orte beließ Hann es jedoch nicht, sondern er strebte die Erfassung ihrer geographischen Zusammenhänge an. Die Klimatologie solle über „ein mosaikähnliches Bild aller der mannigfaltigen Klimate an den verschiedenen Örtlichkeiten“ hinauskommen und „durch eine systematische Darstellung, durch Zusammenfassung natürlich verwandter Klimate in größere Gruppen, unser geistiges Bedürfnis nach Ordnung und Einheit“ befriedigen sowie „die Wechselwirkung und gegenseitige Bedingtheit der Klimate“ aufzeigen (ebd.: 3). Die Klimatologie sah er danach als eine sowohl beschreibende als auch systematisierende Wissenschaft, ähnlich wie die Botanik.

Die von Hann formulierten Forderungen repräsentierten das Arbeits- und Forschungsprogramm eines großen Teils der Klimatologie in den folgenden Jahrzehnten. Dieses Programm führte der deutschstämmige Russe Wladimir Köppen weiter, der seit 1875 als Leiter des damals neu geschaf-

fenen Seewetterdienstes an der Deutschen Seewarte in Hamburg tätig war (Wegener-Köppen 1955: 51). Köppen folgte Hanns Klimaverständnis weitgehend, wenngleich er neben der Beschreibung von lokalen Klimaten auch die Aufgabe ihrer Erklärung betonte. Seines Erachtens ließen sich die unterschiedlichen Klimate durch eine begrenzte Zahl von geographischen Faktoren verstehen, darunter die geographische Breite, die Höhe über dem Meer und die Beschaffenheit der Oberfläche (Köppen 1931: 3).

Köppen führte das von Hann in drei Auflagen veröffentlichte *Handbuch der Klimatologie* in einer neuen Auflage fort. Die „Allgemeine Klimatologie“, die die theoretischen Grundlagen der Klimatologie beschrieb, erfuhr in den verschiedenen Auflagen von 1883, 1897, 1908 (jeweils von Hann herausgegeben) und 1930–1938 (von Köppen zusammen mit Rudolf Geiger herausgegeben) nur wenige grundsätzliche Änderungen. Die „Spezielle Klimatologie“ (die Untersuchung der Klimate der Erde) wuchs hingegen von einem halben Band (1883) bis auf fünf Bände (1930–1938) an und spiegelte die Fortschritte des Hann'schen Programms der beschreibenden Klimatologie (Köppen/Geiger 1930–1938).

Köppens wichtigste und bis heute fortwirkende Leistung war die Realisierung der von Hann geforderten Systematisierung der Klimate. Er sah es – wie Hann – als notwendig an, nicht nur für zahllose individuelle Orte lokale Klimate zu beschreiben, sondern diese Klimate in Klassen mit charakteristischen Eigenschaften zu sortieren und daraus Klimazonen zu ermitteln und eine Klimakarte zu konstruieren. Durch die statistische Verarbeitung einer großen Menge von meteorologischen, geographischen und botanischen Daten entwickelte Köppen eine Klimaklassifikation, die auch heute noch verwendet wird. Köppen unterschied fünf klimatische Hauptklassen (er sprach von „Klimagürteln“ oder „Klimazonen“): tropische Regenklimate, Trockenklimate, warmgemäßigte Regenklimate, kühle Schneeklimate und polare Klimate. Sie unterteilte er ihrerseits in weitere Klassen (Köppen 1900, 1918, 1936).

Köppens Systematik der Klimaklassen und seine Klimakarte sind vielleicht die bekanntesten Produkte der Klimatologie überhaupt. Bis heute werden die Klimate der Erde durch die von Köppen geprägten Begriffe beschrieben. Seine Klimakarte ist in zahlreiche Atlanten aufgenommen und millionenfach gedruckt worden. In jüngster Zeit wurden nach Köppens Systematik neue Klimakarten entwickelt, in denen die geographischen Verschiebungen von Klimazonen durch den Klimawandel berücksichtigt sind.<sup>5</sup>

In seinem Beitrag zur Geschichte der Klimatologie in der *Encyclopedia of World Climatology* zählte der Klimatologe David Miller Hann und Köppen zusammen mit dem Russen Aleksandr Iwanowitsch Woeikof zu den Begründern der klassischen Periode der Klimatologie. Miller datierte sie allerdings auf den viel zu engen Zeitraum zwischen 1855 und 1885 (Miller 2005: 284). Wirksam und prägend war diese klassische Klimatologie vor allem in der er-

sten Hälfte des 20. Jahrhunderts, in der ein Ausbau der Klimatologie an meteorologischen Diensten und Universitäten erfolgte sowie eine Ausweitung und Differenzierung klassischer klimatologischer Forschung (Flohn/Blüthgen 1948, Flohn 1936a, 1951, Reichel 1950). Dazu zählte auch die Etablierung neuer Forschungsfelder wie zum Beispiel die Mikroklimatologie (die Untersuchung von Kleinstklimata und lokalen Klimaeinflüssen), die medizinische oder Bioklimatologie (die Untersuchung von Klimawirkungen auf den Menschen und auf Erkrankungen des Menschen) und die Agrar- und Forstmeteorologie (die Untersuchung von Klimawirkungen auf die Land- und Forstwirtschaft).

Alle diese Forschungszweige waren geprägt vom geographischen Klimaverständnis der klassischen Klimatologie, nach dem der Begriff Klima nur Sinn in Bezug auf einen geographischen Ort hatte und die bodennahen klimatischen Konditionen beschrieb. Dieser Klimabegriff förderte eine Denkrichtung vom punktuellen lokalen Klima zum großräumigeren regionalen Klima bis hin zur Klimazone. Erst aus dem Verständnis der kleinräumigen, lokalen Klimate konnte man zu einem Verständnis großräumiger Klimazusammenhänge gelangen. Von besonderem Interesse waren jene Aspekte des Klimas, die eine Wirkung auf Menschen und auf Landschaften hatten. Im Nutzen der Erkenntnisse der Klimatologie für die Medizin, Landwirtschaft und Forstwirtschaft sahen die Klimatologen in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts die wichtigste praktische Bedeutung ihres Faches (Changnon 1996).

## Anfänge einer modernen Klimatologie

Während Hann und Köppen das Programm der klassischen Klimatologie prägten, wiesen sie gleichzeitig darüber hinaus. Im 19. Jahrhundert beschränkte sich die Sammlung meteorologischer Daten überwiegend auf die bodennahe Schicht der Atmosphäre. Hann wie auch Köppen setzten sich dafür ein, auch für höhere Luftschichten meteorologische Daten zu sammeln. Erst in den letzten Jahrzehnten des 19. Jahrhunderts wurden einzelne Höhendaten zunehmend verfügbar, die vor allem von Gebirgsobservatorien stammten oder mit Hilfe von Drachen- oder Ballonflügen erhoben wurden (Bernhardt 2000). Beobachtungen zur Meteorologie der höheren Luftschichten hatte zwar bereits eine erste, seit 1781 betriebene meteorologische Station auf dem Hohenpeißenberg in Bayern durchgeführt (Winkler 2006), weitere Bergobservatorien entstanden aber erst in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts. Hann setzte sich für den internationalen Ausbau von Bergobservatorien ein (Wege 2002: 19). Seit dem frühen 20. Jahrhundert erfolgte eine rasche Ausweitung der Kenntnisse höherer Luftschichten: die „Entdeckung“ – wie man sagen könnte – oder „Eroberung der dritten Dimension“ der Atmosphäre (Flohn 1951: 210).

Das Anfang des 20. Jahrhunderts wachsende Interesse an höheren Luftschichten hatte einen praktischen Hintergrund. 1903 gelang es den Brüdern Orville und Wilbur Wright erstmals mit einem motorisierten Flugzeug abzuheben. Zur gleichen Zeit entwickelte Graf Ferdinand von Zeppelin seine ersten gewaltigen Luftschiffe. Bereits zehn Jahre später waren das Fliegen und die Luftschiffahrt in aller Munde, wenngleich es bis dahin nur wenige Flugzeuge und Zeppeline gab. Im Ersten Weltkrieg spielte die Luftfahrt – und damit auch die Meteorologie – erstmals eine militärische Rolle. Nach Kriegsende wuchs ihre Bedeutung rasch durch die Entstehung eines kommerziellen Luftverkehrs. Zeppeline und Flugzeuge waren jedoch empfindliche Fluggeräte, deren Einsatz stark vom Wetter abhing. Der Ausbau des Flugverkehrs machte detaillierte Auskünfte über die meteorologische Situation in höheren Schichten der Atmosphäre dringend erforderlich und motivierte die systematische Ausweitung der Sammlung meteorologischer Daten aus höheren Schichten der Atmosphäre (Cartwright/Sprinkle 1996, Harper 2006: 187, 192). Köppen schlug 1906 den Namen „Aerologie“ vor für die Klimatologie der höheren Luftschichten oder – wie es auch hieß – der „freien Atmosphäre“ (Nebeker 1995: 48).

Seit Beginn des 20. Jahrhunderts wurden regelmäßig Drachen und unbemannte Ballons zur Erhebung meteorologischer Daten aus größeren Höhen eingesetzt (Hammerl 2001: 92–102, Klemun 1994). Eine Flut neuer Erkenntnisse erlaubten die seit 1937 in großer Zahl verwendeten Radiosonden, die – mit einem Wetterballon in die Höhe geschickt – Messdaten aus verschiedenen Höhen der Atmosphäre an die Bodenstationen funkten. Dem Innsbrucker Meteorologen Arthur Wagner standen 1930 für seine Klimatologie der freien Atmosphäre die Daten von 3.000 Aufstiegen auf über 4 Kilometer Höhe zur Verfügung (Wagner 1931). Rund zwanzig Jahre später konnten die Wetterdienste die Daten von 180.000 Aufstiegen pro Jahr auf eine Höhe von 15 bis 20 Kilometer verarbeiten, die von 250 meteorologischen Stationen auf der Nordhemisphäre der Erde stammten (Flohn 1971a [1950]: 44).

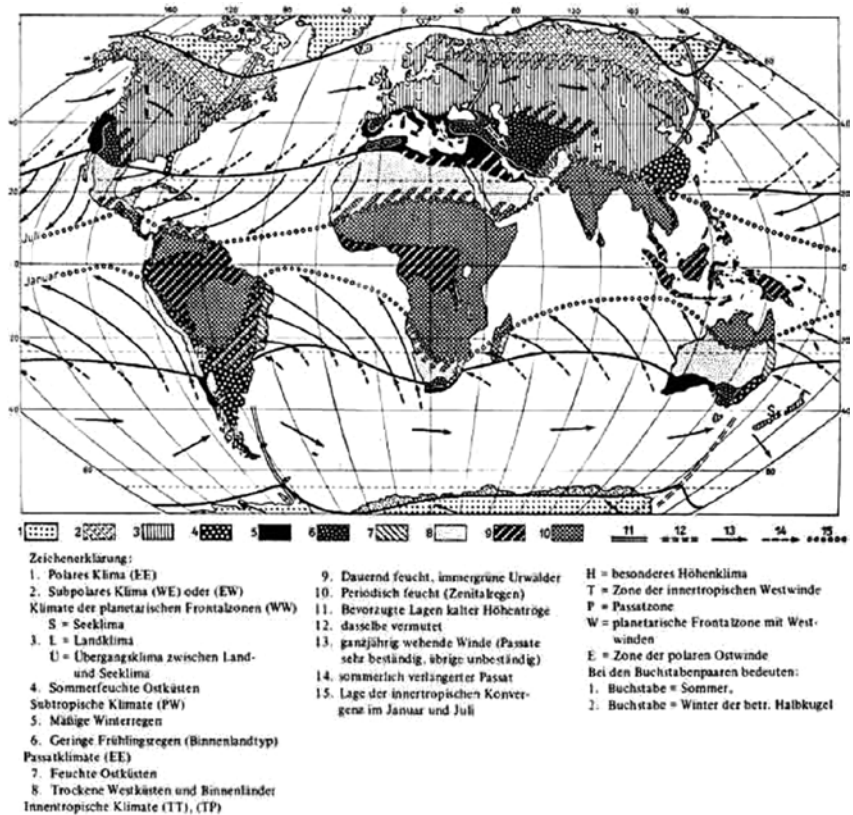
Während die klassische Klimatologie nach Hann und Köppen den Alltagsbetrieb klimatologischer Forschung bis zum Zweiten Weltkrieg dominierte und eine Welle von Arbeiten über lokale Klimate von Orten und Regionen auf der ganzen Erdkugel erschien, gaben die neuen Erkenntnisse über die Meteorologie der freien Atmosphäre einer neuen, mehr physikalisch orientierten Klimatologie Impulse. Höhenkarten von Luftdruck und Luftbewegungen konnten zunehmend verfeinert werden und ließen großräumige Muster der Höhenströmungen genauer erkennen, die sogenannte allgemeine Zirkulation. Eine zentrale Rolle spielte dabei die von dem Physiker Vilhelm Bjerknes begründete Bergener Schule der dynamischen Meteorologie in Norwegen. Bjerknes und seine Mitarbeiter konzentrierten sich auf die Analyse und das Verständnis der großräumigen Bewegungen in der Atmosphäre und führten Begriffe wie „Luftmasse“ oder „Front“ ein (Friedman 1989).

Die Untersuchung großräumiger Zusammenhänge meteorologischer und klimatischer Prozesse stieß unter Vertretern der Klimatologie teilweise auf wachsende Beachtung und beeinflusste zunehmend deren Perspektiven und Verständnisse.<sup>6</sup> Physikalisch orientierte, kausal denkende Klimatologen störten sich an dem bloß beschreibenden Charakter der „Mittelwertsklimatologie“, die einem Verständnis der Ursachen von Klimaphänomenen enge Grenzen setzte. Während die klassische Klimatologie die Vielfalt der Witterungen an einem Ort vernachlässigte und in langzeitigen Mittelwerten verschwinden ließ, weckte die Frage nach den Ursachen von Klimaerscheinungen das Interesse an der zeitlichen Abfolge von Witterungen und ihren großräumigen Zusammenhängen. Tor Bergeron führte den Begriff der dynamischen Klimatologie für diese Form der physikalisch orientierten Klimatologie ein, der sich in vielen Ländern verbreitete.<sup>7</sup> António Gião definierte die dynamische Klimatologie als „the branch of mathematical meteorology which aims at a deduction of the mean properties of the atmospheric perturbations that are compatible with a given mean field of temperature, wind, and pressure“ (Gião 1949: 114, zitiert nach Court 1957: 128).

Es zeigte sich, dass die Betrachtung der dynamischen Prozesse in der Atmosphäre neue, einfache und plausible Deutungen klimatologischer Phänomene ermöglichte. Ein Beispiel dafür ist die Erklärung des Monsuns, den die „klassischen“ Klimatologen vor allem auf die Unterschiede der Erwärmung von Landmassen und Meer zurückgeführt hatten. Flohn zeigte, dass sich das Phänomen des Monsuns auf eine „jahreszeitliche Verlagerung der planetarischen Windgürtel“, also der normalen Muster der allgemeinen Zirkulation, zurückführen ließ (Flohn 1971a [1950]). An Beispielen wie diesem wurde deutlich, dass die klassische Klimatologie mit ihrem lokalen geographischen Ansatz auf Grenzen bei der Erklärung klimatologischer Phänomene stieß. Ein neues Denkmuster etablierte sich. Statt vom lokalen Klima ausgehend auf globale Zusammenhänge und Muster zu schließen, erwies sich der umgekehrte Weg, nämlich von globalen Strömungszusammenhängen auf lokale Phänomene zu schließen, als äußerst fruchtbar (vgl. Abb. 1).

Der Klimatologe und Meteorologe Hermann Flohn bezeichnete 1954 die neue Klimatologie, die die dynamischen Aspekte des Klimas mit einbezog, als „moderne Klimatologie“ oder „Witterungsklimakunde“. Klima beschrieb danach nicht mehr bloß den mittleren Zustand der Atmosphäre an einem Ort, sondern gleichzeitig die Vielfalt und Häufigkeit von Witterungen und Wetterlagen, ihre typische Abfolge in der Zeit und – soweit sie erkennbar waren – die Ursachen, die zu dieser Abfolge von Witterungszuständen führten (Flohn 1954 [1942]: 12, 17).

Während die moderne Klimatologie nach dem Zweiten Weltkrieg in den USA und Skandinavien rasche Unterstützung erfuhr, bestand in den deutschsprachigen Ländern noch längere Zeit beträchtliche Skepsis an dieser methodischen Umkehr (Nebeker 1995: 88–109, Lorenz 1996). Im nationalso-



**Abb. 1:** Zirkulationsgürtel und Klimate nach Hermann Flohn (Das Klimasystem von Hermann Flohn; URL: <http://www.klimakarte.de/> [5.1.2009]).

zialistischen Deutschland wurde die klassische Klimatologie, insbesondere die angewandte Klimatologie, ausgebaut, in der auch Flohn als junger Wissenschaftler seine erste Anstellung fand. Nach dem Krieg bestand eine abwartende Haltung fort, die nicht zuletzt dem Exodus jüdischer Klimatologen während des Nationalsozialismus geschuldet war, darunter einem großen Teil der jungen Generation von Klimatologen (Flohn 1992: 12, 18f.).<sup>8</sup> Der physikalisch orientierte Klimatologe Richard Scherhag kritisierte noch in seinem Lehrbuch von 1960 die neuerdings postulierten globalen Zusammenhänge als „allzu voreilig“ und „ad hoc konstruierte neue Schemata“, „die sich bei näherem Studium keineswegs als fest begründet erwiesen haben.“ Er verwies stattdessen auf die Auffassung des Klimatologen Karl Knoch: „Klimatologie ist regionale Meteorologie“, das heißt eine Meteorologie, die auch die Bedeutung lokaler und kleinräumiger Prozesse im Auge behält (Scherhag 1960: 5, 7). Der Klimageograph Joachim Blüthgen kritisierte seinerseits Scherhag, weil er „physikalisch, aber nicht geographisch ausgerichtet“ sei (Blüthgen 1964: v).

Eine Berücksichtigung der dynamischen Aspekte des Klimas rückte aus einem weiteren Grund stärker in das Zentrum des Interesses. In den 1930er

Jahren stellten Klimatologen auf Grund langjähriger Temperaturmessungen fest, dass eine markante Erwärmung in Nordeuropa und in der Arktis festzustellen war (Scherhag 1936, 1939, Manley 1944). Diese Temperaturänderung wies darauf hin, dass Klimate sich innerhalb von Jahrzehnten ändern konnten und nicht immer so konstant waren, wie von Hann und Köppen vorausgesetzt. Damit wurde die Frage aufgeworfen, welche dynamischen Prozesse zur Veränderung von Klimaten führen konnten (Rudloff 1967).

Die *International Meteorological Organisation* definierte 1935 den Zeitraum von 1901 bis 1930 als „klimatische Normalperiode“, mit der klimatologische Mittelwerte anderer Zeiträume verglichen und Klimaveränderungen festgestellt werden konnten (Lamb 1994 [1982]: 26). In dem von Köppen und Geiger herausgegebenen *Handbuch für Klimatologie* fand diese Festlegung in Form einer leichten Abänderung der ursprünglichen Definition des Klimas ihren Niederschlag. Als Klima beschrieb der österreichische Klimatologe und Geophysiker Victor Conrad nun „den mittleren Zustand der Atmosphäre über einem bestimmten Erdort, bezogen auf eine bestimmte Zeitepoche“. Damit fand ein ausdrücklicher Zeitbezug von Klima, also die Anerkennung der Veränderbarkeit von Klima, Berücksichtigung (Conrad 1936: 1, Flohn 1954 [1942]: 12).

Die von Flohn beschriebene moderne Klimatologie beinhaltete somit sowohl geographische als auch physikalische Vorstellungen von Klima. Ihr Klimabegriff bedeutete eine Erweiterung von Fragestellungen, Problemen und Forschungsansätzen der klassischen Klimatologie und umfasste vier Aspekte: erstens die Berücksichtigung der dritten Dimension der Atmosphäre, die der neue Klimabegriff einschloss; zweitens eine Loslösung vom lokalen Ort durch Einbeziehung großräumiger atmosphärischer Strömungen; drittens die Untersuchung der zeitlichen Abfolge von Witterungen und die langfristige zeitliche Veränderung von Klimaten; und viertens die stärkere Einbeziehung der Untersuchung von Ursachen lokaler und regionaler Klimate. Während die klassische Klimatologie vom lokalen Klima ausging, um zu großräumigen Klimaregionen zu gelangen, ging die moderne Klimatologie von großräumigen Phänomenen aus, um lokale Klimate zu verstehen. Setzten Humboldt und seine Nachfolger an der lokal erfassbaren Wirkung des Klimas auf Lebewesen und Umwelt an, standen nun die großräumigen Ursachen des Klimas stärker im Vordergrund.

Es ist offen, ob Flohn in der modernen Klimatologie eine kohärente Disziplin mit einer einheitlichen fachlichen Community und Identität sah. Zumindest versuchte er mit diesem Begriff eine Vereinigung der Ansätze und Erkenntnisse der klassischen, geographisch orientierten und der dynamischen, physikalisch orientierten Klimatologie zu beschreiben (Flohn 1954 [1942]: 12f.). Klimatologen wie Flohn, Scherhag oder Conrad können als Repräsentanten einer solchen modernen Klimatologie angesehen werden.

## Von der Klimatologie zur Klimaforschung

Von der modernen Klimatologie zur Klimaforschung war es noch ein beträchtlicher Schritt. Eine entscheidende Rolle spielte die Entwicklung der dynamischen Meteorologie, die bereits die moderne Klimatologie maßgeblich beeinflusst hatte, sich aber weitgehend unabhängig und parallel zum Tagesgeschäft der Klimatologen entwickelte. Zwar wertete Flohn die dynamische Meteorologie 1936 als eine Teildisziplin der Klimatologie (Flohn 1936a). Doch diese Einordnung war wohl eher ein Wunschbild und täuscht darüber hinweg, dass die dynamische Meteorologie überwiegend von Wissenschaftlern vorangetrieben wurde, die sich nicht der Klimatologie zurechneten, sondern der Physik oder der physikalisch orientierten Meteorologie.

Nach dem Zweiten Weltkrieg entwickelte sich die dynamische Meteorologie, angetrieben von dem Ehrgeiz, die Wetterentwicklung mathematisch zu erfassen und vorherzuberechnen, zu einer entscheidenden Einflussgröße für die Entstehung der Klimaforschung. Ausgangspunkt dafür war jener Teil von Bjerknes Arbeit, der für die moderne Klimatologie noch kaum Bedeutung besaß: die Beschreibung des physikalischen Geschehens der Atmosphäre durch sieben meteorologische Parameter und sechs Differentialgleichungen, die Bjerknes aus den Gesetzen der Physik ableitete. Diese Gleichungen repräsentierten im Prinzip eine Beschreibung des Wettergeschehens zu jedem Zeitpunkt an jedem Ort. Eine Wettervorhersage würde die vollständige Wetterbeschreibung zu einem Anfangszeitpunkt sowie die Lösung dieses Gleichungssystems voraussetzen.<sup>9</sup>

Bjerknes Ansatz standen zwei zentrale Probleme im Weg. Erstens erforderte die Lösung der Differentialgleichungen die exakte Kenntnis der Atmosphäre zu einem Anfangszeitpunkt, also einen vollständigen Satz an meteorologischen Daten aus allen Orten und Luftschichten, der freilich nicht zur Verfügung stand. Zweitens gab es für diese Differentialgleichungen wegen ihrer Komplexität keine analytische Lösung. Bjerknes nahm dennoch beide Probleme in Angriff. Zum einen setzte er sich vehement für den Ausbau von Messstationen und meteorologischen Netzen ein, um eine bessere Datengrundlage für meteorologische Berechnungen zu erhalten. Zum anderen konzentrierte er sich auf graphische Lösungsmethoden der Differentialgleichungen, mit deren Hilfe einfache Näherungslösungen bestimmt werden konnten (Friedman 1989: 61–80, Nebeker 1995: 52).

Einen alternativen Weg wählte der britische Mathematiker und Physiker Lewis Fry Richardson, der mit seiner Arbeit die konzeptionellen und mathematischen Grundlagen der später entwickelten Wetter- und Klimasimulation schuf (Richardson 1965 [1922], Lynch 2006). Richardson vollzog dabei drei entscheidende Schritte: Erstens entwickelte er eine arithmetische Lösungsprozedur der Differentialgleichungen, mit der rechnerisch Näherungslösungen bestimmt werden konnten. Heute werden Methoden wie diese als

„numerische“ Lösungen von Differentialgleichungen bezeichnet. Zweitens definierte er ein weites Netz mit Rastern von circa  $250 \text{ km} \times 250 \text{ km}$  über Europa. Da man nicht für jeden Punkt in der Atmosphäre die Differentialgleichungen lösen konnte, wollte Richardson für einzelne Rasterelemente ein sozusagen gemitteltes Wetter berechnen. Drittens musste er für seine Rechnungen eine enorme Menge an meteorologischen Daten zusammentragen, um den meteorologischen Anfangszustand, von dem seine Rechnung ausgehen sollte, zu definieren. Da ihm diese Datenmenge nicht zur Verfügung stand, entwickelte er Abschätzungsmethoden, um fehlende Daten indirekt zu ermitteln oder durch Interpolation oder Extrapolation verfügbarer Daten zu bestimmen (Nebeker 1995: 65–68, Aspray 1992: 127–129).

Auf Basis dieser Methoden führte Richardson für zwei Rasterelemente die Berechnung einer 24-stündigen Wettervorhersage durch, eine Rechnung, für die er sechs Wochen benötigte. Richardson war sich der Tatsache bewusst, dass eine brauchbare Wettervorhersage innerhalb von deutlich weniger als 24 Stunden berechnet werden musste. Dafür war seiner Schätzung nach eine – wie er es nannte – „Forecast Factory“ mit 64.000 Mitarbeitern als menschliche Rechner erforderlich (Richardson 1965 [1922]: 219).

Richardsons Berechnungsexperiment verlief wegen des seinerzeit unbekannten Problems numerischer Instabilitäten nicht erfolgreich und erbrachte eine verfehlte Vorhersage (Nebeker 1995: 104f., Dahan Dalmedico 2001: 399). Erst etwa drei Jahrzehnte später sah der Mathematiker John von Neumann erneut die Chance, eine wissenschaftliche Wettervorhersage zu realisieren. Die US-Armee hatte 1942 die Entwicklung eines ersten Computers in den USA in Auftrag gegeben, der vor allem ballistischen Berechnungen diene. Von Neumann erkannte den Wert des Computers als wissenschaftliches Instrument. 1946 versammelte er ein Team von Mathematikern und Meteorologen, um Wetterberechnungen auf dem Computer durchzuführen (Aspray 1992: 134). Die Computertechnik versprach einen epochalen Fortschritt, weil sie – wie von Neumann hoffte – den enormen erforderlichen Rechenaufwand leisten und somit auch sehr komplexe und umfangreiche Berechnungsprobleme in kurzer Zeit bewältigen konnte. Von Neumanns Mitarbeiter entwickelten aus dem komplizierten System der von Bjerknes entwickelten Differentialgleichungen ein drastisch vereinfachtes Modell der Physik der Atmosphäre, in dem beispielsweise die Vertikalbewegungen in der Atmosphäre vollständig vernachlässigt wurden. Trotz der extremen Vereinfachungen, die auf erhebliche Kritik unter anderem von Norbert Wiener stießen (Arakawa 2000: 6), waren die ersten Rechnungen auf dem Computer ENIAC im März und April 1950 so vielversprechend, dass sie große Erwartungen weckten (Platzman 1979: 311, Nebeker 1995: 144f., Arakawa 2000: 6).

Bis Anfang der 1960er Jahre konnten die Berechnungen des Wetters (auf inzwischen deutlich leistungsfähigeren Computern) so weit perfektioniert

werden, dass sie mit manuellen Vorhersagen konkurrieren konnten (Shuman 1989: 288f.). Doch der Computer eröffnete weitaus mehr Möglichkeiten als die Vorhersage des Wetters. Jule Charney, der Kopf des Teams in von Neumanns Meteorologieprojekt, sprach von einer „radical alteration that is taking place“. Diese „radikale Veränderung“ sah er darin, dass der Computer als „induktive Maschine“ verwendet und mit ihm Simulationsexperimente durchgeführt werden konnten (Charney 1955: 798, zitiert nach Aspray 1992: 152). Er wurde zu einem Instrument für wissenschaftliche Experimente. Begriffe wie „Simulationsexperiment“ oder „numerisches Experiment“ verbreiteten sich in den folgenden Jahren, obwohl diese Experimente wenig mit dem zu tun hatten, was Naturwissenschaftler traditionell unter Experimenten verstanden hatten (ebd.: 155–171).

1955 unternahm Norman Phillips, der zu von Neumanns Team zählte, ein solches und – wie sich zeigen sollte – wegweisendes Experiment. Anstelle der Wetterberechnung über wenige Tage wollte Phillips eine längerfristige Wetter- und Klimaentwicklung simulieren. Dafür entwickelte er ein neues, im Vergleich zum Wettervorhersagemodell noch einmal drastisch vereinfachtes Modell, in dem es zum Beispiel keine Berge und keinen Unterschied zwischen Land und Meer gab. Phillips startete die Simulation mit dem unrealistischen Anfangszustand einer unbewegten Atmosphäre mit einer vollständig einheitlichen Temperatur, auf die lediglich die Sonnenstrahlung und die Erdbewegung einwirkten. Durch diese Vereinfachung vermied er das Problem, einen vollständigen Satz realistischer Ausgangsdaten der Wetersituation bereitstellen zu müssen. Sein Atmosphärenmodell ließ Phillips über einen Zeitraum von 31 Tagen laufen (Phillips 1956, Lewis 1998: 47). Die Ergebnisse waren hochinteressant. Trotz der erheblichen Vereinfachungen schien das Modell bekannte meteorologische Phänomene zu reproduzieren: Es bildeten sich im Verlauf der Simulation drei sogenannte Zirkulationszellen, die zur Bildung von Zyklonen, von wirbelförmigen Hoch- und Tiefdruckgebieten führten. Auch stellten sich starke Westwinde in großer Höhe ein, die den realen Höhenströmungen oder Jet Streams glichen (Lewis 1998: 48f.).

Phillips selbst bewertete die Simulationsergebnisse 1956 folgendermaßen:

It is of course not possible to state definitively that this [...] is a complete representation of the principal energy changes occurring in the atmosphere, since our equations are so simplified, but the verisimilitude of the forecast flow patterns suggests quite strongly that it contains a fair element of truth. (Zit. nach Lewis 1998: 51)

Der englische theoretische Meteorologe Eric Eady hob ebenfalls die Bedeutung von Phillips' Simulation hervor: „Numerical integration of this kind Dr. Phillips has carried out give[s] us [the] unique opportunity to study large-scale meteorology as an experimental science.“ (Ebd.: 52)

Phillips hatte damit eine neue Simulationsmethode realisiert. Die herkömmlichen Wettermodelle dienten der Berechnung realistischer Wettervorhersagen. Sie repräsentierten die Physik der Atmosphäre, um Vorhersagen zu generieren. Im Gegensatz dazu war Phillips Klimamodell ein Experimentierinstrument, mit dessen Hilfe Hypothesen, etwa fiktiv veränderte Zustände in der Atmosphäre und ihre Folgen, untersucht werden konnten, ähnlich wie der Experimentalphysiker einen Versuchsaufbau gezielt manipuliert, um bestimmte Prozesse oder Einflussfaktoren zu untersuchen. Die unterschiedliche methodische Rolle des Einsatzes dieser Computermodelle bei Wettervorhersagen oder Klimasimulationen führte zu Bezeichnungen wie „prognostische Modelle“ (Wettervorhersage) und „heuristische Modelle“ (Klimasimulation) oder „physikalische Modelle“ und „Labormodelle“, obwohl es sich um identische Modelle beziehungsweise Computerprogramme handeln konnte (Dahan Dalmedico 2001). Die Modelle vereinten somit die Eigenschaften einer Theorie (zur Berechnung von Prozessen) und eines experimentellen Aufbaus (zur Überprüfung gezielter Manipulationen durch Simulation).

Phillips Modell war die erste einfache Variante eines Modelltyps, der als General Circulation Model – kurz GCM – bezeichnet wurde. GCMs sind globale, abgewandelte Versionen der Wettervorhersagemodelle, die über sehr lange Zeiträume laufen und als Klimamodelle dienen. Innerhalb weniger Jahre entstanden mehrere Arbeitsgruppen in den USA, zuerst am U.S. Weather Bureau, an der University of California in Los Angeles, im kalifornischen Lawrence Livermore Laboratory und am National Center for Atmospheric Research in Boulder, Colorado, aber seit den 1970er Jahren auch außerhalb der USA zuerst im European Centre for Medium Range Weather Forecasts in Reading, Großbritannien, und im Australian Numerical Meteorological Research Centre in Melbourne.<sup>10</sup> Ende der 1960er Jahre waren GCMs zu einem „zentralen Werkzeug der Klimawissenschaften“ geworden, obwohl sie im Vergleich zur Komplexität atmosphärischer Prozesse nach wie vor sehr primitiv waren (Edwards 2000b: 232, McGuffie/Henderson-Sellers 2001).

Vor allem drei Faktoren trugen dazu bei, dass Klimamodelle sich rasch als ein Forschungsinstrument durchsetzten und maßgeblich zu einer Veränderung von Klimaverständnissen und Forschungsschwerpunkten beitragen konnten. Erstens nährten sie die Hoffnung, Klimaprozesse und Klimaveränderungen ‚experimentell‘ untersuchen und vorhersagen zu können. Zweitens profitierten sie von der Neuheit, Leistungsfähigkeit und dem damit verbundenen Reiz und Prestige der Computernutzung. Und drittens repräsentierten sie eine Forschungsstrategie, die nicht nur interessante Anwendungen ermöglichte, sondern auch mannigfache Perspektiven der Weiterentwicklung beinhaltete.

In Klimamodellen ließen sich experimentell atmosphärische Parameter verändern, wie die Zusammensetzung der Atmosphäre oder die Strah-

lungsbilanz. Die daraus resultierenden Konsequenzen für das Klima konnten dann durch Berechnungen auf dem Computer ermittelt werden. Eine offensichtliche Anwendung für ein solches Experiment war die Frage des zunehmenden Kohlendioxidgehalts in der Atmosphäre, der durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe verursacht wurde. Der schwedische Physiker Svante Arrhenius und der britische Ingenieur Guy Callendar hatten wegen zunehmender Kohlendioxidgehalte in der Atmosphäre bereits am Ende des 19. Jahrhunderts (Arrhenius) und in den 1930er Jahren (Callendar) Temperaturerhöhungen vorhergesagt (Crawford 1996: 145–155, Fleming 1998: 74–82, 2007: 65–87). Doch diese Vorhersagen waren von den Klimatologen nicht ernst genommen worden. Sie hielten Klimaveränderungen wie die Erhöhung der durchschnittlichen Temperaturen zwischen 1910 und 1940 für natürliche Schwankungen. Nach 1940 waren die Temperaturen überdies wieder rückläufig gewesen (zum Beispiel Rudloff 1967: 64, 256).

In den 1950er Jahren brachten die Ozeanographen Hans Suess und Roger Revelle die Diskussion um wachsende Kohlendioxidanteile wieder auf (Weart 2003: 26–31). Suess prägte 1957 den berühmt gewordenen Ausspruch, die Menschheit führe mit der Verbrennung fossiler Brennstoffe „ein großes geophysikalisches Experiment“ durch (Hart/Victor 1993: 651). Die Auswirkungen konnten Klimawissenschaftler nun mit Hilfe von Klimamodellen zu ermitteln versuchen. Simulationsexperimente, die in den 1960er und frühen 1970er Jahren mit verschiedenen Klimamodellen durchgeführt wurden, bestätigten Arrhenius' und Callendars Ergebnisse und ergaben für einen im Vergleich zu vorindustriellen Zeiten verdoppelten Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre eine Temperaturerhöhung zwischen 1°C und 6°C (Manabe/Weatherald 1975, Edwards 2000b: 240).

Ogleich die Computermodelle drastische Vereinfachungen beinhalteten und notwendigerweise unsichere Ergebnisse produzierten, setzte sich die Verwendung von Klimamodellen rasch durch und stieß bei Klimaforschern kaum auf grundsätzliche Ablehnung. Nach Auffassung des Historikers Paul Edwards profitierte dieses Forschungsfeld vom Prestige des Computers (Edwards 2000b: 240). Den aus Simulationen ermittelten Berechnungsergebnissen wurde eine neue und höhere Glaubwürdigkeit zugestanden als den mit viel einfacheren Methoden ermittelten Ergebnissen von Arrhenius und Callendar. Gleichzeitig übte die Klimasimulation einen großen Reiz aus. Klimamodelle und leistungsfähige Computer boten die Möglichkeit, eine Vielzahl von physikalischen Prozessen zu integrieren und ihre Bedeutung für das Klima zu untersuchen. Die zeitlichen Veränderungen und systemischen Zusammenhänge von Klimafaktoren wie Sonneneinstrahlung, Wolkenbedeckung, Albedo, anthropogenen Emissionen oder Kohlenstoffkreisläufe ließen sich nun auf dem Computer ‚experimentell‘ ermitteln (Weart 2007a). Klimamodelle repräsentierten somit ein attraktives Forschungsinstrument, das ein weites Feld zukünftiger Untersuchungen öffnete.

Die Entwicklung der Klimamodelle nahm zu einem Zeitpunkt Fahrt auf, als die gemessenen globalen Temperaturen stagnierten, teilweise sogar zurückgingen. Die Beobachtungsdaten gaben keine Anhaltspunkte dafür, dass einseitige und rasche Klimaänderungen zu erwarten waren (Rudloff 1967: 167–208). Dennoch wandelte sich durch die Perspektiven der Simulation das Interesse der Klimaforscher drastisch. Es ging nicht mehr um die statistische Auswertung von Datenreihen, um die Bestimmung und Erklärung lokaler Klimate oder um die Wirkung des Klimas auf die menschliche Gesundheit wie in der klassischen Klimatologie. Es ging auch nicht in erster Linie um die Erfassung der globalen Zirkulation und ihre Bedeutung für lokale Klimate, wie sie die Vertreter der modernen Klimatologie interessierte. Es ging nun vor allem um „Treibhauseffekt“ und Klimawandel und damit um die Fragen, ob, wie und warum sich das Klima im Laufe der Zeit verändert hat und welche physikalischen Prozesse dafür verantwortlich zu machen sind. Der Interessenwandel spiegelte sich in einer Konferenz, die 1965 am neu gegründeten National Center for Atmospheric Research in Boulder, USA, unter dem Titel *Causes of Climate Change* durchgeführt wurde (Mitchell 1968). Eine zentrale Rolle auf dieser Konferenz spielte die Idee des Treibhauseffekts durch einen wachsenden Kohlenstoffdioxidanteil in der Atmosphäre.

In den 1970er Jahren setzte sich für diese Forschungsrichtung der Begriff Klimaforschung durch, durchaus in Abgrenzung zum Begriff der Klimatologie, dem nunmehr das Image antiquierten Datensammelns anhaftete (Laurmann 1976, National Academy of Sciences 1979, Weart 2007b). Das neue Interesse am Klimawandel prägte die Forschungsperspektiven und -schwerpunkte der nächsten Jahrzehnte. Im Zentrum standen die Entwicklung und der Einsatz von Klimamodellen, die zu einer Art Königsdisziplin der Klimaforschung wurden. Die Forscher sahen ihre stetig wachsenden Modelle als eine Synthese des verfügbaren Wissens über das Klima an. Zudem schufen sie das politisch wichtige Monopol der Berechnung von Klimavorhersagen (Hart/Victor 1993: 655).

Bis Mitte der 1970er Jahre erfassten die Modelle lediglich den Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre und Niederschläge. Die Beschreibung von Wolken, Eis und Landschaftsbedeckung kamen bis Mitte der 1980er Jahre hinzu. Ende dieses Jahrzehnts wurden einfache Beschreibungen der Ozeane in die globalen Klimamodelle integriert, Anfang der 1990er Jahre zusätzlich Effekte durch vulkanische Aktivität und die Emission von Sulfaten. Die Klimamodelle hießen nun nicht mehr Global Circulation Models, sondern Ocean-Atmosphere Global Circulation Models (IPCC 2007b: 98f.). Die Klimamodellierung hatte überdies eine formende Wirkung auf weitere Schwerpunkte der Klimaforschung, wie die Ausweitung von Datenerfassung für die genauere und vollständigere Beschreibung der Zustände der Atmosphäre (durch ausgeweitete Messnetze und Satellitenbeobachtungen) oder die Ermittlung historischer Klimadaten durch die Paläoklimatologie (Edwards 1999).

Die Etablierung der Klimaforschung ging einher mit der Durchsetzung eines neuen Klimabegriffs und einer Umwertung von Wissen und Werten. Das neue Konzept war entscheidend an die Eigenschaften der Klimamodelle geknüpft. Erstens stand nur noch die zeitliche Veränderung großräumiger Klimate im Vordergrund, wie sie mit Klimamodellen simuliert werden konnte, während räumliche Variationen in den Hintergrund rückten. Die Dominanz des Parameters Zeit zeigte sich in der Karriere des neu geprägten und rasch in das Zentrum der wissenschaftlichen und öffentlichen Aufmerksamkeit gerückten Begriffs des Klimawandels.<sup>11</sup>

Zweitens hatte sich der Begriff des Klimas von der Bindung an einen geographischen Ort abgelöst und war zu einem weltweiten Phänomen, zu einer Art Weltklima geworden. In den globalen Klimamodellen verschwanden konkrete geographische Orte in abstrakten Rasterelementen. Diese Modelle beförderten ein Klimaverständnis, nach dem das Klima als ein globales Phänomen angesehen wurde. Weniger geeignet waren sie hingegen für die Erzeugung von Erkenntnissen über lokale Klimate, weil sie nur über eine sehr beschränkte räumliche Auflösung verfügten. An die Stelle von zeitlichen Mittelwerten in Abhängigkeit vom Ort, die die klassische Klimatologie prägten, traten in der Klimaforschung räumliche Mittelwerte in Abhängigkeit von der Zeit. Diese Schwerpunktverschiebung zeigte sich auch in einem im Vergleich zur ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts deutlichen Rückgang geographisch orientierter Untersuchungen regionaler oder lokaler Klimate (Stanhill 2001). Derartige Untersuchungen machten im Zusammenhang mit dem veränderten Klimabegriff auch wenig Sinn.

Drittens wurde die Temperatur zur klaren Leitgröße für die Beschreibung von Klima und Klimaveränderungen. Demgegenüber traten andere Klimaparameter wie Niederschläge, Windgeschwindigkeiten oder Sonneneinstrahlung deutlich zurück. Die wichtigste und meist-diskutierte Eigenschaft des globalen Klimas war am Ende des 20. Jahrhunderts die mittlere globale Temperatur (IPCC 2007b: 100–103) – ein Begriff der hundert Jahre zuvor wenig Sinn gemacht hätte. Vergleicht man die Ergebnisse aus Klimasimulationen, wie sie etwa in den IPCC-Berichten dargestellt wurden, mit der Diskussion von Klimaveränderungen eines Klimatologen wie Ernst Rudloff, dann fällt ein drastischer Rückgang der Berücksichtigung klimatologischer und geographischer Details auf. Rudloff bezog sich in seiner Diskussion von Klimaschwankungen ausführlich auf alle Klimaparameter, die in langjährigen Messreihen erfasst worden waren, und betrachtete penibel ihre geographischen und zeitlichen Variationen (Rudloff 1967). Ein solch vielgestaltiges und kleinteiliges Bild vermochten Klimamodelle nicht zu erzeugen.

Viertens veränderte sich die Vorstellung von einem ganzheitlichen Zugriff auf das Klima deutlich, die auch die modernen Klimaforscher für sich beanspruchten. Suchte Humboldt eine vollständige Erfassung der Klima-

elemente, die eine Wirkung auf den Menschen ausübten, so betrachteten die modernen Klimaforscher das Klima als ein komplexes, weltumspannendes, physikalisches System. Bis in die 1970er Jahre beschränkte sich dieser Klimabegriff weitgehend auf die Vorgänge in der Atmosphäre. In den folgenden Jahrzehnten wurden Hydrosphäre (Ozeane und Gewässer), Biosphäre (Pflanzenbewuchs, Tiere, Menschen), Kryosphäre (Eis und Schnee in Polargebieten und Gebirgen) sowie Pedosphäre und Lithosphäre (Böden und Erdkruste) zum Klimasystem hinzugerechnet. Der Begriff Klima repräsentierte damit ein umfassendes „Klimasystem“ (IPCC 2007b: 104). Fünftens rückte das Interesse daran, die Wirkung des Klimas auf Menschen und Landschaften zu untersuchen, weit in den Hintergrund. Im Zentrum des Interesses stand am Ende des 20. Jahrhunderts umgekehrt die Wirkung des Menschen auf das Klima.

Die vor allem seit den 1950er Jahren erfolgte Verschiebung des Klimaverständnisses stieß nicht allorten auf Begeisterung. Der Klimageograph Joachim Blüthgen betonte in seinem Lehrbuch von 1964 demonstrativ die geographischen Gesichtspunkte des Klimabegriffs. Die „gegenüber der Geographie völlig anders geartete und organisierte Meteorologie“ sei jetzt „so stark mit ihren eigenen Problemen beschäftigt [...], daß es an fruchtbaren, einen Austausch fördernden Berührungen zwischen beiden ursprünglich so nahe verwandten Disziplinen mehr und mehr mangelt“ (Blüthgen 1964: v). Hinter dieser Klage standen freilich die Einsicht und der Unmut darüber, dass geographische Aspekte des Klimabegriffs und eine derartig orientierte Klimatologie gegenüber der physikalischen Klimaforschung an Bedeutung verloren hatten (Stanhill 2001, Changnon 1996).

## Klimabegriffe im 20. Jahrhundert

Der Begriff Klima ist nicht statisch, sondern hat sich im Verlauf des 20. Jahrhunderts deutlich verändert. Aus einem räumlichen, tendenziell zeitlosen Verständnis zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurde ein zeitlicher, tendenziell raumloser (zumindest ortloser) Begriff. Eine geographische Wissenschaft wurde zu einer physikalischen (Koelsch 1996). Diese Veränderung erfolgte schrittweise in verschiedenen Phasen, die als klassische Klimatologie (bis etwa 1950), moderne Klimatologie (circa 1930 bis 1970) und Klimaforschung (seit etwa 1950) identifiziert werden können. Die begrifflichen Unterscheidungen zwischen „klassisch“ und „modern“ beziehungsweise „Klimatologie“ und „Klimaforschung“ wurden von den Wissenschaftlern selbst geprägt, um die Weiterentwicklung oder Veränderung ihrer Disziplin zu beschreiben und von älteren Traditionen abzugrenzen. In Tabelle 1 sind charakteristische Merkmale des Klimabegriffs in allen drei Perioden pointiert zusammengestellt.

<b>Klassische Klimatologie (bis etwa 1950)</b>	<b>moderne Klimatologie (ca. 1930–1970)</b>	<b>Klimaforschung (ca. 1950–2000)</b>
Merkmale und Zugriff: ganzheitlicher Klimabegriff lokaler Zugriff vom Kleinklima zum Großklima	Merkmale und Zugriff: ganzheitlicher Klimabegriff lokaler und globaler Zugriff vom Großklima zum Kleinklima	Merkmale und Zugriff: reduktionistischer Klimabegriff globaler Zugriff vom Großklima zum Kleinklima
Methodik: geographisch orientiert deskriptiv, quantitativ, qualitativ systematisierend empirische Datensammlung und statistische Auswertung Mittelwerte meteorologischer Größen	Methodik: geographisch und physikalisch deskriptiv, quantitativ und kausal qualitativ empirische Datensammlung und sta- tistische Auswertung qualitative Analyse großräumiger Zusammenhänge	Methodik: physikalisch orientiert kausal, quantitativ mathematische Zusammenhänge Datenerhebung und -produktion Differentialgleichungen, numerische Lösungsverfahren und Computersimulation
Interessen und Schwerpunkte: Wirkung des Klimas auf Mensch und Umwelt räumliche Verteilung lokaler Klimate Zersplitterung in Teildisziplinen (spezielle Klimatologie, Aerologie, Bioklimatologie u.a.)	Interessen und Schwerpunkte: lokale und globale Ursachen des Klimas räumliche und zeitliche Verteilung von Klima; Ursachen von Klima- änderungen Zersplitterung in geographische und dynamische Klimatologie	Interessen und Schwerpunkte: Ursachen des Klimas und anthro- pogene Einflüsse zeitliche Veränderung des globalen Klimas (Klimadynamik) Kohärenz durch Fokussierung aller Teilgebiete auf das Problem des Klimawandels

**Tab. 1:** Gegenüber-  
stellung von Eigen-  
schaften der klassischen  
Klimatologie, modernen  
Klimatologie und der  
Klimaforschung.

Die Veränderung des Klimaverständnisses war kein geradliniger Prozess, der sich innerhalb einer kohärenten Disziplin vollzog. Aerologie und dynamische Meteorologie, die in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts zur Entstehung der modernen Klimatologie führten, standen am Rande oder außerhalb der klassischen Klimatologie. Ihre Begriffe und Überzeugungen lösten jene der „klassischen Klimatologie“ nicht einfach ab, sondern existierten zunächst eher parallel zu diesen. Auch die Antriebe für Aerologie und dynamische Meteorologie gingen auf äußere Einflüsse zurück. Einerseits erforderte der aufkommende militärische und zivile Flugverkehr nicht nur präzise meteorologische Informationen aus allen Lufthöhen, sondern auch gute Wettervorhersagen. Andererseits verfolgten Physiker das wissenschaftliche Interesse, zu einem physikalischen Verständnis von Wetter und Klima zu gelangen. Die moderne Klimatologie repräsentierte ein interessantes Übergangsstadium, das durch ein sowohl geographisches als auch physikalisches Verständnis des Klimas geprägt war. Flohn hatte die Hoffnung, dass die moderne Klimatologie eine Synthese repräsentierte, gekennzeichnet durch einen neuen, erweiterten Klimabegriff. Doch der entpuppte sich eher als ein mehrdeutiges, einerseits geographisches, andererseits physikalisches Konstrukt, mit dessen Verwendung die fachliche Identität der community der Klimatologen unterwandert wurde und das deshalb das Potential zu einer Spaltung der Disziplin in sich trug.<sup>12</sup>

Diese Trennung und zudem eine drastische Gewichtsverschiebung innerhalb des disziplinären Feldes erfolgten in der zweiten Hälfte des 20. Jahr-

hunderts. Es war nicht von vornherein ausgemacht, dass der physikalische Klimabegriff rasch die Oberhand gewinnen und Grundlage für die Entstehung einer vollkommen neuartigen Klimaforschung werden sollte. Den entscheidenden Anstoß dafür gaben die Verfügbarkeit und Nutzung des Computers und die Entstehung von Klimamodellen, die weitgehend unabhängig von der Klimatologie und eher parallel zu ihr erfolgten. Die Eigenschaften dieses neuen Forschungsinstruments und die damit rasch erzielten Erfolge führten sehr schnell zu einer Dominanz der neuen Klimaforschung und des neuartigen Interesses der Forscher am Klimawandel. Die Klimaforschung war keine Weiterentwicklung der Klimatologie (ob in ihrer klassischen oder modernen Variante), sondern eine neue Disziplin, die sich parallel zur Klimatologie etablierte. Dazu führte aber nicht die Beobachtung eines Klimawandels, wie die Beiträge der Klimaforscher in den 1950er und 1960er Jahre zeigen. Es war die Einführung der neuen Forschungsmethode, die die Entstehung und Veränderung von Klima zu untersuchen erlaubte und damit maßgeblich zur Dominanz des Interesses am Problem des Klimawandels beitrug.<sup>13</sup> Die geographische Klimatologie verlor hingegen als relativ unbedeutendes Teilgebiet der Geographie dramatisch an Bedeutung.

Die Verschiebungen von klassischer zu moderner Klimatologie und von moderner Klimatologie zur Klimaforschung nahmen ihren Ausgang jeweils in verschiedenen nationalen wissenschaftlichen Umgebungen. Die Begründung der klassischen Klimatologie und ihrer Begriffe erfolgte überwiegend in den deutschsprachigen Ländern. Die dynamische Meteorologie, die für die Entwicklung der modernen Klimatologie von Bedeutung war, wurde entscheidend von dem Physiker Bjerknes angetrieben und erlebte ihren Durchbruch zuerst in den skandinavischen Ländern. Die Computersimulation als wissenschaftliche Methode trieb hingegen der Mathematiker von Neumann voran, sie setzte sich zuerst in den USA durch.<sup>14</sup> Prägend wurden alle diese Innovationen jedoch innerhalb weniger Jahrzehnte auf internationaler Ebene.

Die Verschiebungen des Klimabegriffs, die mit diesen Entwicklungen erfolgten, beinhalteten nicht nur Gewinne, sondern auch Verluste. In mathematischer Hinsicht ist der Klimabegriff der Klimaforschung der komplexeste, den Wissenschaftler hervorgebracht haben. Doch er ist deshalb nicht unbedingt der umfassendste. Im Vergleich zum Klimaverständnis der Klimatologie hat die Konzentration auf den Klimawandel die geographische Bedeutung dieses Begriffs in den Hintergrund treten lassen. Die differenzierte Betrachtung lokaler Klimate und ihrer Veränderungen in Jahreszeiten und Jahren sowie ihre Wirkung auf Fauna, Flora, Mensch und landwirtschaftliche Produktion, die im Zentrum der klassischen Klimatologie standen, hatten in der Klimaforschung bis zum Ende des 20. Jahrhunderts nur einen geringen Stellenwert. Eine von der US-amerikanischen National Academy of Science beauftragte Kommission unter der Leitung von Jule Charney stellte 1979

fest, dass die Unfähigkeit, lokale Klimate vorherzusagen, eine entscheidende Schwäche der Klimamodelle sei (Weart 2007a). Im letzten Jahrzehnt des 20. Jahrhunderts mehrten sich die Versuche, regionale Klimate zu simulieren (Zwiers/Zhang 2003). Doch mit der Erhöhung der räumlichen Auflösung steigen nicht nur die Voraussetzungen an die Rechenleistung, sondern auch die Unsicherheiten der berechneten Klimaprognosen erheblich an. Eine Überprüfung von sieben regionalen Modellen in den 1990er Jahren zeigte, dass einerseits die Ergebnisse verschiedener Modelle voneinander abwichen und andererseits Niederschläge generell deutlich überschätzt, Lufttemperaturen hingegen weniger beachtet wurden (Christensen u.a. 1997).

Jüngste Entwicklungen weisen darauf hin, dass die zurückgedrängten Ebenen des Klimabegriffs wieder an Bedeutung gewinnen. Stand in den letzten zwei Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts die Frage nach dem globalen Klimawandel und seinen Ursachen im Zentrum der Forschung, so mehrte sich am Beginn des 21. Jahrhunderts das Interesse an der Vorhersage regionaler Klimate und lokaler Folgen, die der jüngste Bericht des IPCC als eine der „key uncertainties“ benannte (IPCC 2007b: 72). Da Hoffnungen auf eine Vermeidung globaler Klimaerwärmungen an Glaubwürdigkeit verloren haben, rückt die Entwicklung regionaler Anpassungsstrategien in den Vordergrund (IPCC 2007a). Politik und Gesellschaft benötigen dafür gute Kenntnisse über regionale und lokale Klimaentwicklungen und ihre Wirkung auf Menschen und Landschaften, auf Landwirtschaft, Gesundheit und Lebensbedingungen – Interessen, wie sie in der Klimatologie Humboldt'scher Prägung bereits im Vordergrund standen.

---

## Anmerkungen

- 1 Hart/Victor 1993, Fleming 1998, 2007, Edwards 2000a, Weart 2003, 2007.
- 2 Für einen Überblick siehe Miller 2005.
- 3 Eine sehr ähnlich lautende Definition verfasste nahezu zeitgleich Samuel Forry in den USA, der in Diensten des Army Medical Departments stand und klimatologische Beobachtungen zusammentrug (Fleming 1990: 68f.).
- 4 Anderson 2005, Bernhardt 2003, Wege 2002, Hammerl 2001, Fleming 1990.
- 5 Gerstengarbe/Werner 2008, Peel u.a. 2007, Kottek u.a. 2006, Beck u.a. 2006. Die sehr gute neuberechnete Klimakarte von Kottek u. a. (2006) ist leicht im Internet zugänglich auf der Seite <http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/> [28. Januar 2009].
- 6 Bergeron 1930, Flohn 1936a, 1971b [1950], Reichel 1950, Hare 1955.
- 7 Bergeron 1930, Hesselberg 1932, Gordon 1953, Hare 1955.
- 8 Die Geschichte der Klimatologie im Dritten Reich ist bisher nur unzureichend erforscht.
- 9 Bjerknes 1904, s. auch Friedman 1989: 55, Kutzbach 1996, Aspray 1992: 124–125, der die Differentialgleichungen in moderner Schreibweise angibt.
- 10 Eine Übersicht zur Geschichte der GCMs bieten die Beiträge in Randalls 2000, insbes. Edwards: 70–80 und Arakawa: 6–8, 21.
- 11 Im jüngsten, 2007 veröffentlichten Bericht des IPCC wird konsequenterweise der Ausdruck „Klimawandelforschung“ beziehungsweise „Klimawandelwissenschaft“ („climate change research“, „climate change science“) verwendet (z. B. IPCC 2007b: 95, 103, 121, Stanhill 2001).

- 12 In der mehrbändigen Bestandsaufnahme deutscher Forschungsleistungen zwischen 1939 und 1946 (FIAT Reviews), die die Alliierten nach dem Zweiten Weltkrieg durchführen ließen, wurde diese Differenz augenscheinlich. Die Klimatologie fand zweifach, in zwei verschiedenen Bänden Berücksichtigung: als physikalische Wissenschaft im Band 19, „Meteorologie und Physik der Atmosphäre“, und als geographische Wissenschaft im Band 44, „Geographie“. Für beide Beiträge zeichnete Hermann Flohn als Autor bzw. Mitautor (Flohn 1948, Flohn/Blüthgen 1948).
- 13 Pioniere wie Norman Phillips, Akio Arakawa und andere erwähnten das Problem des Klimawandels überhaupt nicht, sondern interessierten sich für die mathematische Beschreibung und die Vorhersagbarkeit physikalischer Phänomene in der Atmosphäre (s. dazu Arakawa 2000).
- 14 Weshalb so auffällige unterschiedliche nationale und regionale Schwerpunkte existierten, ist bisher nur unzureichend untersucht.

---

## Literatur

- Anderson, Katharine, 2005. *Predicting the Weather. Victorians and the Science of Meteorology*. Chicago: Chicago University Press.
- Arakawa, Akio, 2000. A Personal Perspective on the Early Years of General Circulation Modelling at UCLA. In: David A. Randalls, Hg., *General Circulation Model Development*. San Diego: Academic Press, 1–65.
- Aspray, William, 1992. *John von Neumann and the Origins of Modern Computing*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Beck, Christoph u.a., 2006. *Characterizing Global Climate Change by Means of Köppen Climate Classification*. URL: [http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/pdfs/beck\\_et\\_al\\_ksb\\_2006.pdf](http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/pdfs/beck_et_al_ksb_2006.pdf) [zugegriffen am 19. März 2008].
- Bergeron, Tor, 1930. Richtlinien einer dynamischen Klimatologie. *Meteorologische Zeitschrift*, 47, 246–262.
- Bernhardt, Karl-Heinz, 1984. Alexander von Humboldts Auffassung vom Klima und sein Beitrag zur Einrichtung von meteorologischen Stationsnetzen. *Zeitschrift für Meteorologie*, 34, 213–217.
- Bernhardt, Karl-Heinz, 2000. Zur Erforschung der Atmosphäre mit dem Freiballon. Die Berliner wissenschaftlichen Luftfahrten (1888–1899). *Dahlemer Archivgespräche*, 6, 52–82.
- Bernhardt, Karl-Heinz, 2003. Alexander von Humboldts Beitrag zu Entwicklung und Institutionalisierung von Meteorologie und Klimatologie im 19. Jahrhundert. In: Jürgen Hamel, Eberhard Knobloch und Herbert Pieper, Hg., *Alexander von Humboldt in Berlin. Sein Einfluß auf die Entwicklung der Wissenschaften*. Augsburg: Erwin Rauner Verlag (=Algorismus. Studien zur Geschichte der Mathematik und der Naturwissenschaften 41), 195–221.
- Bjerknes, Vilhelm, 1904. Das Problem der Wettervorhersage, betrachtet vom Standpunkte der Mechanik und der Physik. *Meteorologische Zeitschrift*, 21, 1–7.
- Blüthgen, Joachim, 1964. *Allgemeine Klimageographie*. Berlin: Walter de Gruyter.
- Cartwright, Gordon D./Sprinkle, Charles H., 1996. A History of Aeronautical Meteorology. Personal Perspectives, 1903–1995. In: James Rodger Fleming, Hg., *Historical Essays on Meteorology, 1919–1995*. Boston: American Meteorological Society, 443–480.
- Changnon, Stanley A., 1996. Applied Climatology. A Glorious Past, an Uncertain Future. In: James Rodger Fleming, Hg., *Historical Essays on Meteorology, 1919–1995*. Boston: American Meteorological Society, 379–393.
- Charney, Jule, 1955. Numerical Methods in Dynamical Meteorology. *Proceedings of the National Academy of Science*, 41, 798–802.
- Christensen, J. H. u.a., 1997. Validation of Present-Day Regional Climate Simulations over Europe. LAM Simulations with Observed Boundary Conditions. *Climate Dynamics*, 13, 489–506.
- Conrad, Victor, 1936. Die klimatologischen Elemente und ihre Abhängigkeit von terrestrischen

- Einflüssen. In: Wladimir Köppen, Hg., *Handbuch der Klimatologie*, Bd. 1, Teil B. Berlin: Verlag von Gebrüder Borntraeger.
- Court, Arnold, 1957. Climatology: Complex, Dynamic and Synoptic. *Annals of the Association of American Geographers*, 47, No. 2, 125–136.
- Crawford, Elisabeth, 1996. *Arrhenius: From Ionic Theory to the Greenhouse Effect*. Canton, MA: Science History Publications.
- Dahan Dalmedico, Amy, 2001. History and Epistemology of Models. Meteorology (1946–1963) as a Case Study. *Archive for the History of the Exact Sciences*, 55, 395–422.
- Edwards, Paul, 1999. Uncertainty and Politics. Data-laden Models, Model-filtered Data. *Science as Culture*, 8, 437–472.
- Edwards, Paul, 2000a. A Brief History of Atmospheric General Circulation Modelling. In: David A. Randall, Hg., *General Circulation Development, Past Present and Future. The Proceedings of a Symposium in Honor of Akio Arakawa*. New York: Academic Press, 67–90.
- Edwards, Paul, 2000b. The World in a Machine. Origins and Impacts of Early Computerized Global Systems Models. In: Thomas P. Hughes und Agatha C. Hughes, Hg., *Systems, Experts, and Computers*. Cambridge, MA: MIT Press, 221–254.
- Fleming, James Rodger, 1990. *Meteorology in America, 1800–1870*. Baltimore: Johns Hopkins University Press.
- Fleming, James Rodger, 1998. *Historical Perspectives on Climate Change*. Oxford/New York: Oxford University Press.
- Fleming, James Rodger, 2007. *The Callendar Effect. The Life and Work of Guy Stewart Callendar (1898–1964). The Scientist who Established the Carbon Dioxide Theory of Climate Change*. Boston: American Meteorological Society.
- Flohn, Hermann, 1936a. Neue Wege in der Klimatologie. I. Klima und Witterung. *Zeitschrift für Erdkunde*, 4, 12–22.
- Flohn, Hermann, 1936b. Neue Wege in der Klimatologie. II. Angewandte Klimatologie. *Zeitschrift für Erdkunde*, 4, 337–345.
- Flohn, Hermann, 1948. Klima der freien Atmosphäre. Naturforschung und Medizin in Deutschland 1939–1946. In: *Meteorologie und Physik der Atmosphäre*. (=FIAT Review of German Science 19), 24–29. Wiesbaden: Dietrich'sche Verlagsbuchhandlung.
- Flohn, Hermann, 1951. Ergebnisse und Probleme der Meteorologie 1940 bis 1950. *Naturwissenschaftliche Rundschau*, 4, 201–210.
- Flohn, Hermann, 1954 [1942]. *Witterung und Klima in Mitteleuropa*. Stuttgart: S. Hirzel Verlag [2. Aufl.].
- Flohn, Hermann, 1971a [1950]. Tropische und außertropische Monsunzirkulation. In: Ders., *Arbeiten zur allgemeinen Klimatologie*. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 1–42 [Berichte des Deutschen Wetterdienstes in der US-Zone, 18, 34–52].
- Flohn, Hermann, 1971b [1950]. Neue Anschauungen über die allgemeine Zirkulation der Atmosphäre und ihre klimatische Bedeutung. In: Ders., *Arbeiten zur allgemeinen Klimatologie*. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 43–80 [Erdkunde, 4, 141–162, 256].
- Flohn, Hermann, 1992. *Meteorologie im Übergang. Erfahrungen und Erinnerungen (1931–1991)*. Bonn: Dümmler (=Bonner Meteorologische Abhandlungen, 40).
- Flohn, Hermann/Blüthgen, Joachim, 1948. Klimatologie. Naturforschung und Medizin in Deutschland 1939–1946. In: *Geographie*. (=FIAT Review of German Science, 44, Teil I), 42–69. Wiesbaden: Dietrich'sche Verlagsbuchhandlung.
- Friedman, Robert Marc, 1989. *Appropriating the Weather. Bjerknes and the Construction of Modern Meteorology*. Ithaca, NY: Cornell University Press.
- Frisinger, H. Howard, 1973. Aristotle's Legacy in Meteorology. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 54, 198–204.
- Gerstengarbe, F.-W./Werner, P. C., 2008. A Short Update on Koeppen Climate Shifts in Europe between 1901 and 2003. *Climatic Change*, [URL: <http://www.springerlink.com/content/100247/?k=Gerstengarbe> (18. Juni 2008)].
- Gião, Antonio, 1949. A New Dynamical Climatology. Its Aim and Method. *Geofisica Pura e Applicata*, 15, 114–129.
- Gordon, Adrian H., 1953. Dynamic Climatology. *WMO Bulletin*, 2, 121–124.

- Hammerl, Christa, 2001. Die Geschichte der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik 1851–2001. In: Dies. u.a., Hg., *Die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik 1851–2001. 150 Jahre Meteorologie und Geophysik in Österreich*. Wien: Leykam, 19–297.
- Hann, Julius, 1883. *Handbuch der Klimatologie*. Stuttgart: Engelhorn.
- Hann, Julius, 1897. *Handbuch der Klimatologie*. 2., wesentlich umgearbeitete und vermehrte Auflage. Stuttgart: Engelhorn.
- Hann, Julius, 1908. *Handbuch der Klimatologie*. Bd. 1. 3., wesentlich umgearbeitete und vermehrte Auflage. Stuttgart: Engelhorn.
- Hantel, Michael, 2001. 150 Jahre österreichische Beiträge zur Klimatologie. In: Dies. u.a., Hg., *Die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik 1851–2001: 150 Jahre Meteorologie und Geophysik in Österreich*. Wien: Leykam, 313–332.
- Hare, F. Kenneth, 1955. Dynamic and Synoptic Climatology. *Annals of the Association of American Geographers*, 45, 152–162.
- Harper, Kristine C., 2006. Meteorology's Struggle for Professional Recognition in the USA (1900–1950). *Annals of Science*, 63, 179–199.
- Hart, David M./Victor, David G., 1993. Scientific Elites and the Making of US Policy for Climate Change Research, 1957–1974. *Social Studies of Science*, 23, 643–680.
- Hesselberg, Theodor, 1932. Arbeitsmethoden einer dynamischen Klimatologie. *Beiträge zur Physik der freien Atmosphäre*, 19, 291–305.
- Humboldt, Alexander von, 1845. *Kosmos. Entwurf einer physischen Weltbeschreibung*. Bd. 1. Stuttgart/Tübingen: Cotta'scher Verlag.
- IPCC, 2007a. *Climate Change 2007. Fourth Assessment Report. Working Group I: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC, 2007b. *Climate Change 2007. Synthesis Report*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Janković, Vladimir, 2000. *Reading the Skies. A Cultural History of English Weather, 1650–1820*. Manchester: Manchester University Press.
- Klemun, Marianne, 1994. Aufbau und Organisation des meteorologischen Messnetzes in Kärnten (19. Jh.). *Carinthia II*, 184, 97–114.
- Knobloch, Eberhard, 2004. Naturgenuss und Weltgemälde. Gedanken zu Humboldts Kosmos. Humboldt im Netz. *International Review for Humboldtian Studies*, V, 9, 3–16.
- Koelsch, William A., 1996. From Geo- to Physical Science. Meteorology and the American University, 1919–1945. In: James Rodger Fleming, Hg., *Historical Essays on Meteorology, 1919–1995*. Boston: American Meteorological Society, 511–540.
- Köppen, Wladimir, 1900. Versuch einer Klassifikation der Klimate vorzugsweise nach ihren Beziehungen zur Pflanzenwelt. *Geographische Zeitschrift*, 6, 593–611, 657–679.
- Köppen, Wladimir, 1918. Klassifikation der Klimate nach Temperatur, Niederschlag und Jahresablauf. *Petermanns Geographische Mitteilungen*, 64, 193–203, 243–248.
- Köppen, Wladimir, 1931. *Grundriss der Klimakunde*. Berlin: Walter de Gruyter.
- Köppen, Wladimir, 1936. Das geographische System der Klimate. In: Wladimir Köppen und Rudolf Geiger, Hg., *Handbuch der Klimatologie in fünf Bänden*, Bd. 1: *Allgemeine Klimalehre*, Teil C. Berlin: Bornträger.
- Köppen, Wladimir/Geiger, Rudolf, Hg., 1930–1938. *Handbuch der Klimatologie*. 5 Bde. Berlin: Bornträger.
- Körber, Hans-Günther, 1959a. Über Alexander von Humboldts Arbeiten zur Meteorologie und Klimatologie. In: *Alexander von Humboldt: 14. 9. 1769–6. 5. 1859. Gedenkschrift zur 100. Wiederkehr seines Todestages*. Berlin: Akademie-Verlag, 289–335.
- Körber, Hans-Günther, 1959b. Bemerkungen über die Erstveröffentlichung der schematischen Jahresisothermenkarte Alexander von Humboldts. *Forschungen und Fortschritte*, 33, 355–358.
- Kottek, Markus u.a., 2006. World Map of Köppen-Geiger Climate Classification Updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15, 259–263.
- Kutzbach, J. E., 1996. Steps in the Evolution of Climatology. From Descriptive to Analytic. In: James Rodger Fleming, Hg., *Historical Essays on Meteorology, 1919–1995*. Boston: American Meteorological Society, 353–377.
- Lamb, Hubert Horace, 1994 [1982]. *Klima und Kulturgeschichte. Der Einfluß des Wetters auf*

- den Gang der Geschichte. Reinbek: Rowohlt [original: Climate, History and the Modern World. London: Methuen].
- Laurmann, J. A., 1976. Climate Research. *Science*, 191, 1002–1005.
- Lewis, John M., 1998. Clarifying the Dynamics of the General Circulation. Phillips's 1956 Experiment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79, 39–60.
- Lorenz, Edward N., 1996. The Evolution of Dynamic Meteorology. In: James Rodger Fleming, Hg., *Historical Essays on Meteorology, 1919–1995*. Boston: American Meteorological Society, 3–19.
- Lynch, Peter, 2006. *The Emergence of Numerical Weather Prediction. Richardson's Dream*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Manabe, Syukuro/Weatherald, Richard T., 1975. The Effects of Doubling the CO<sub>2</sub> Concentration on the Climate of a General Circulation Model. *Journal of Atmospheric Sciences*, 23, 3–15.
- Manley, Gordon, 1944. Some Recent Contributions to the Study of Climatic Change. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 73, 197–219.
- McGuffie, K./Henderson-Sellers, A., 2001. Forty Years of Numerical Climate Modelling. *International Journal of Climatology*, 21, 1067–1109.
- Miller, David H., 2005. History of Climatology. In: John E. Oliver, Hg., *Encyclopedia of World Climatology*. Dordrecht: Springer, 283–289.
- Mitchell, J. Murray, Jr., 1968. *Causes of Climatic Change. Proceedings of the VII Congress of the International Union for Quaternary Research*. Boston: American Meteorological Society.
- National Academy of Sciences, 1979. *Carbon Dioxide and Climate. A Scientific Assessment. Report of the Climate Research Board*. Washington, DC: National Academy of Sciences.
- Naylor, Simon, 2006. Nationalizing Provincial Weather. Meteorology in Nineteenth-Century Cornwall. *British Journal for the History of Science*, 39, 407–433.
- Nebeker, Frederik, 1995. *Calculating the Weather. Meteorology in the 20th Century*. San Diego: Academic Press.
- Peel, M. C./Finlayson, B. L./McMahon, T. A., 2007. Updated World Map of the Köppen-Geiger Climate Classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 1633–1644.
- Phillips, Norman, 1956. The General Circulation of the Atmosphere. A Numerical Experiment. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 82, 123–164.
- Platzman, George W., 1979. The ENIAC Computations of 1950 – Gateway to Numerical Weather Prediction. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 60, 302–312.
- Randalls, David A., Hg., 2000. *General Circulation Model Development*. San Diego: Academic Press.
- Reichel, Eberhard, 1950. Entwicklungslinien der Klimatologie. *Naturwissenschaftliche Rundschau*, 3, 440–446.
- Richardson, Lewis Fry, 1965 [1922]. *Weather Prediction by Numerical Process*. Unveränderter Nachdruck. New York: Dover Publications [Originalausgabe: Cambridge: Cambridge University Press].
- Rudloff, Hans von, 1967. *Die Schwankungen und Pendelungen des Klimas in Europa seit dem Beginn der regelmäßigen Instrumenten-Beobachtungen (1670)*. Braunschweig: Vieweg.
- Scherhag, Richard, 1936. Eine bemerkenswerte Klimaänderung über Nordeuropa. *Annalen der Hydrographischen Meteorologie*, 64, 96–100.
- Scherhag, Richard, 1939. Die gegenwärtige Milderung der Winter und ihre Ursachen. *Annalen der Hydrographie und maritimen Meteorologie*, 67, 292–303.
- Scherhag, Richard, 1960. *Einführung in die Klimatologie*. Braunschweig: Westermann.
- Shuman, Frederick G., 1989. History of Numerical Weather Prediction at the National Meteorological Center. *Weather and Forecasting*, 4, 286–296.
- Stanhill, Gerald, 2001. The Growth of Climate Change Science. A Scientometric Study. *Climatic Change*, 48, 515–524.
- Wagner, Artur, 1931. Klimatologie der freien Atmosphäre. In: Wladimir Köppen und Rudolf Geiger, Hg., *Handbuch der Klimatologie*, Bd. 1, Teil F. Berlin: Bornträger.
- Weart, Spencer, 2003. *The Discovery of Global Warming*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Weart, Spencer, 2007. *General Circulation Models*. American Institute of Physics. URL: <http://www.aip.org/history/climate/GCM.htm> [zugegriffen am 5. Januar 2009].

- Weart, Spencer, 2007a. *Climatology as a Profession*. American Institute of Physics. URL: <http://www.aip.org/history/climate/climogy.htm> [zugegriffen am 5. Januar 2009].
- Wege, Klaus, 2002. *Die Entwicklung der meteorologischen Dienste in Deutschland*. Offenbach: Deutscher Wetterdienst.
- Wegener-Köppen, Else, 1955. *Wladimir Köppen. Ein Gelehrtenleben. Nach Köppens eigenen Aufzeichnungen*. Stuttgart: Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft.
- Winkler, Peter, 2006. *Hohenpeißenberg 1781–2006 – das älteste Bergobservatorium der Welt*. Offenbach: Deutscher Wetterdienst.
- Zwiers, F. W./Zhang, X., 2003. Toward Regional Scale Climate Change Detection. *Journal of Climate*, 16, 793–97.

Matthias Heymann  
Department of Science Studies  
University of Aarhus  
C. F. Møllers Allé 8  
DK-8000 Aarhus C  
E-Mail: [matthias.heyman@ivs.au.dk](mailto:matthias.heyman@ivs.au.dk)

