

1 VON EINFACHEN MODELLEN ZU ERDSYSTEMEN

In keiner Disziplin anderen zeigt sich die Bedeutung des Computers als Forschungs-, Experimentier- und Prognoseinstrument deutlicher als in der Klimaforschung. Das sozio-politische Interesse an den Resultaten der Klimamodellierer hat die Klimaforschung zu einer der führenden Simulationswissenschaft werden lassen. Der Computer wird als Labor für Experimente mit dem simulierten Klima genutzt, und durch diese Computerexperimente hat sich die Klimaforschung in den letzten Jahrzehnten zu einer experimentellen Wissenschaft gewandelt. Diese neue Form der Experimentalkultur wird seit 1989 durch die alle fünf bis sechs Jahre erscheinenden Assessment Reports des IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change in einzigartiger Weise synchronisiert. Die internationale Koordinierung von mehr als zwanzig Klimamodellen hat eine prototypische, epistemische Kultur des Simulierens geschaffen, mit einer internationalen Infrastruktur der Modellentwicklung, des Modelltests und des Vergleichs von Simulationsmodellen und -resultaten. Daher ist die Klimaforschung wie kein anderes Wissenschaftsfeld prädestiniert, die neue Kultur der Computerexperimente vor Ort in den Forschungsinstituten der Klimamodellierer zu untersuchen. War die Astronomie die Leitdisziplin des Umbruchs von der mittelalterlichen zur neuzeitlichen Wissenschaft, so stellt die Klimaforschung die Leitdisziplin in den sich aktuell entwickelnden Simulationswissenschaften dar.

Forschungsobjekt Atmosphäre

„Im Laboratorium des Meteorologen, in der uns umgebenden Atmosphäre,“ schreibt August Schmauß 1942 in seinem Buch *Das Problem*

der *Wettervorhersage*, „ist jedes Element in dauernder Veränderung; es gibt immer neue Bilder, wie in einem Kaleidoskop, das uns mit jeder Drehung einen neuen Anblick verschafft. Der Vergleich ist noch zu günstig, denn im Kaleidoskop sind wenigstens die einzelnen Farbgläschen voneinander unabhängig; im meteorologischen Kaleidoskop aber ändern die Teilstücke auch noch ihre Eigenschaften bei der Bewegung“ (Schmauß 1942: 3). Die Aufgabe des Meteorologen ist es daher, dieses Wechselspiel der atmosphärischen Zustände und der daraus resultierenden Wetter- und Witterungsphänomene zu erforschen, zu verstehen und schließlich vorherzusagen. Doch die Aufgabe wird noch komplizierter, wenn man den Blickwinkel auf dieses Wechselspiel der Variablen verändert und sich von den erlebbaren Wetter- und Witterungserfahrungen löst, um langfristige und globale Veränderungen zu studieren. Seit es möglich ist, globale Messdaten der Atmosphäre zu erheben und langfristige Messreihen zu rekonstruieren, zeugt die Zweiteilung der Meteorologie in Wetterkunde und Klimaforschung von diesem neuen Blickwinkel.¹ Mit den aktuellen Debatten um den von Menschen verursachten Klimawandel steht die Meteorologie vor einer weiteren Verkomplizierung ihrer Aufgabe, denn sie hat nun auch die sich verändernden klimatischen Faktoren auf aktuelle Wetterphänomene zu berücksichtigen.

Dieses zunehmend komplexe meteorologische Kaleidoskop zeigt sich im epistemischen Wandel des Forschungsgegenstandes der Meteorologie während der letzten Jahrhunderte. Zu Beginn stand die kosmologisch-geometrische Sicht auf meteorologische Phänomene, die auf das 340 v. Chr. von Aristoteles verfasste Werk *Meteorologica* zurückgeht. Aristoteles diskutierte Erscheinungen wie Wirbelwinde, Erdbeben oder Kometen und gliederte diese in Empedokles kosmologisches System der vier Elemente ein. Dazu teilte er – beginnend mit der Erde, gefolgt von Luft, Wasser und Feuer – den Kosmos in vier Sphären auf (vgl. Aristoteles 1970). Diese Eingliederung der Meteorologie in ein kosmologisches System hielt sich bis ins Mittelalter. El-Kazwini, ein arabischer Gelehrter des 13. Jahrhunderts, ordnete in seiner *Kosmographie* den Himmelsphären bestimmte Temperatureigenschaften zu:

„Die Luft ist ein einfacher Körper, dessen natürliche Beschaffenheit darin besteht, dass er heiß und feucht, durchsichtig und fein und in steter Bewegung nach der Stelle ist, die unterhalb der Feuersphäre und oberhalb der Wassersphä-

1 Paläoklimadaten der letzten Jahrhunderte bis Jahrtausende werden aus Proxy-Daten durch Analyse von Eisbohrkernen, Sedimentablagerungen oder fossilen Materialien rekonstruiert. Diese Datenarchäologie des Klimas gibt lediglich Auskunft über die lokalen Wetterbedingungen am Fundort und lässt daher nur bedingt Rückschlüsse auf das Klima vergangener Epochen zu.

re liegt. Man behauptet, die Tiefe des Himmels lasse sich in drei Abtheilungen zerlegen, deren erste in der Nähe der Mondsphäre, deren zweite nahe der Oberfläche des Wassers oder der Erde und deren letzte das Dazwischenliegende sei. Die am Mondhimmel befindliche Luft ist Feuer von äußerster Hitze [...] das in der Mitte liegende ist äußerst kalt [...] das der Erde Naheliegende endlich ist an einem Orte gemäßigt, an einem anderen weniger und heißt die sanfte Luft“ (El-Kazwini 1904: 127).

Die meteorologische Kenntnis jener Zeit basierte auf direkt erlebbaren Wettererscheinungen wie Stürme, Niederschläge, Wolkenformationen, Temperaturveränderungen. Informationen zu klimatischen Unterschieden polarer und tropischer Witterungen, unterschiedliche Jahresgänge und regelmäßige Winde wurden durch Reiseberichte überliefert.² Das Medium, in welchem sich diese meteorologischen Erscheinungen ereignen, bezeichnete man als Luftkörper der Erde, als Atmosphäre – griechisch: *atmos* (Dunst, Dampf) und *spharia* (Kugel) – oder als Luftmeer (vgl. Humboldt 1858). Über die Beschaffenheit und Bewegungsursache dieses Luftmeeres wurden zahlreiche Spekulationen angestellt. So wird in der Schrift von El-Kazwini die Ursache der Bewegung der sanften Luft, die wir als Winde erleben, durch ihr Hin- und Herwogen erklärt, ähnlich dem Wellenschlag des Meeres. Wobei das Wogen durch den Aufstieg warmer Luft, deren Abkühlung in der mittleren Sphäre und dem dadurch verursachten Herabsinken erklärt wird. El-Kazwini verweist auf die Sonneneinstrahlung als Ursache der Erwärmung und Bewegung der Luft. Diese Erklärung mutet im Unterschied zum kosmologischen Gesamtrahmen fast modern an. Sie erinnert an Edmond Halleys 1686 publizierte Entdeckung, dass niedrigere Breitengrade mehr solare Einstrahlung erhalten als höhere und dass der daraus resultierende Temperaturgradient den Motor der atmosphärischen Zirkulation darstellt (vgl. Halley 1686). Die unterschiedliche Erwärmung der Luft führt zur Ausdehnung und Druckveränderung und damit zur Zirkulation. Halley war damit der Erste, der nach strikt physikalischen Ursachen dieser Bewegung forschte, und lange Zeit galt die Druckveränderung aufgrund von unterschiedlichen Temperatureinstrahlungen als einzige Bewegungsursache der Winde. Erst 1735 brachte

2 „Während die Begleiter des Columbus vor der Beständigkeit des Passates erschrecken, dessen unveränderte Richtung ihnen jeden Rückweg zu versperren schien, nannten die spanischen Matrosen schon zu Don Ulloas Zeiten dieselben tropischen Gewässer ‚das Meer der Damen‘, weil die Schifffahrt dort so leicht sei, dass ein Mädchen das Steuer führen könne [...] da der stetige Wind sie doch sicher an das Ziel ihrer Reise nach den Philippinen führe. Der Name ‚Trade-Winds‘, welchen die Engländer dem Passat gegeben, könnte aber auch mit vollem Recht den Monsoons oder Moussons beigelegt werden“ (Dove 1837: 243).

George Hadley eine weitere Kraft ins Spiel, als er die Rotation der Erde als Ursache mitdachte (vgl. Hadley 1735). Doch sowohl Halley wie Hadley hatten die regelmäßigen Strömungsverhältnisse der Tropen vor Augen. Die sehr viel komplizierteren Windverhältnisse der gemäßigten Breiten konnten sie damit nicht erklären. „Alle Physiker, welche eine Theorie der Winde zu geben versucht haben,“ schreibt Heinrich Dove 1837, „sind bei der Erörterung der regelmässigen Erscheinungen unter den Tropen stehen geblieben, welches ihnen gewiss nicht verdacht werden kann, da es passend ist, in einer sehr verwickelten Aufgabe den einfachsten Fall zuerst zu betrachten“ (Dove 1837: 124). Dove hingegen wollte eine Begründung der Strömungsverhältnisse geben, die nachweist, „dass die Erscheinung der Passate, der Moussons und die verwickelten Windverhältnisse der gemäßigten und kalten Zonen nothwendige und einfache Folgen derselben physikalischen Grundbestimmungen sind“ (Dove 1837: 124, 125). Dove erklärt aus dem Gradienten der Rotationsgeschwindigkeit die verschiedenen Windmuster der Regionen:

„Die Rotationsgeschwindigkeit der einzelnen Punkte der Oberfläche der Erde verhält sich wie die Halbmesser der Parallelkreise, unter welchen sie liegen, sie nimmt also zu von den Polen, wo sie Null ist, bis zum Äquator. Im Ruhezustand nimmt die Luft Theil an der Drehungsgeschwindigkeit des Ortes, über welchen sie sich befindet. [...] Wird aber die Luft durch irgendeine Ursache von den Polen nach dem Äquator getrieben, so kommt sie von Orten, deren Rotationsgeschwindigkeit gering ist, nach Orten, an welchen sie größer ist. Die Luft dreht sich dann mit einer geringeren Geschwindigkeit nach Osten, als die Orte, mit welchen sie in Berührung kommt [...] Daraus folgt: auf der nördlichen Halbkugel gehen Winde, welche als Nordwinde entstehen, bei den allmählichen Fortrücken durch NO immer mehr in Ost über (Dove 1837: 125).

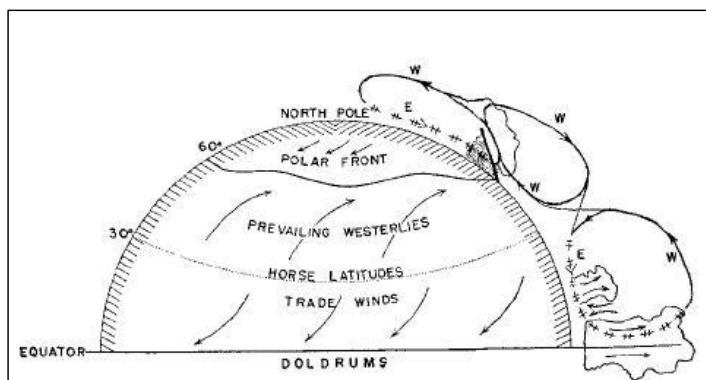


Abbildung 7: Großräumige Zirkulationsmuster (Lewis 2000: 96)

Auf diese Weise entstand ein erstes konzeptionelles Modell der Atmosphäre und ihrer großräumigen Zirkulationsmuster, wie in Abbildung 7 dargestellt. Dieses Modell wurde 1858 von William Ferrel komplettiert, indem er die Coriolis Kraft auf die Atmosphäre anwandte, also die Ablenkung eines Partikels durch seine Beschleunigung, hervorgerufen durch die Erdrotation. Diese Ablenkung, so stellte Ferrel fest, gehe in der nördlichen Hemisphäre nach rechts, in der südlichen nach links. „With this ‚new force‘ taken into account, the earth’s atmosphere generated three circulation cells and oblique wind in mid-latitudes with high velocities from the west. Moreover, high pressure at the poles which would be expected because of low temperature was reversed to low pressure by the excessive centrifugal force of the whirling winds. Conversely, high pressure was generated near the tropics. Ferrel’s theoretical results, which Cleveland Abbe called the *principia meteorologica*, were in accordance with the latest observations“ (Fleming 2002: 210).

Parallel zu diesen empirisch motivierten Untersuchungen der atmosphärischen Strömungen beschäftigte sich die Hydrodynamik mit dem Bewegungsverhalten von Gasen und Flüssigkeiten. Allerdings behandelten die hydrodynamischen Konzepte Strömungen in idealisierten, also inkompressiblen und reibungsfreien Fluiden. Basierend auf Isaac Newtons zweitem Axiom hatte Leonhard Euler 1755 die grundlegende Bewegungsgleichung für Strömungsprozesse in idealisierten Fluiden formuliert. 1822 fügte Claude M. Navier einen weiteren Term hinzu, der Eulers Gleichung in eine Beschreibung für viskose Fluide überführte. Viskosität beschreibt die innere Reibung eines Fluids, die von dünn- bis zähflüssig reichen kann. Unabhängig von Navier formulierte George Stokes 1845 Eulers Gleichungen ebenfalls für viskose Fluide um. Die Navier-Stokes-Gleichungen werden bis heute verwendet, um die Änderung des Betrags und der Richtung der Geschwindigkeit eines Fluidelements gewisser Masse in Abhängigkeit von den einwirkenden Kräften wie Druck, Schwerkraft und Reibung mathematisch zu formulieren. Doch die Gleichungen sind zu komplex, als dass man sie für konkrete Probleme wie die Strömungsverhältnisse der Atmosphäre anwenden konnte. Daher musste man auf die einfacheren, aber idealisierten Bedingungen zurückgreifen. Das Problem der einfacheren Konzepte war jedoch, dass sie die Entstehung von Turbulenzen und Wirbeln in idealisierten Fluiden nicht erklären konnten. Beides spielt jedoch für jedes praktische Strömungsproblem eine wichtige Rolle. Zwar postulierte Hermann von Helmholtz 1858, dass auch in idealisierten Fluiden Wirbel existieren können. Doch diese mussten als vorhanden angenommen werden und konnten weder vergehen, noch entstehen (vgl. Helmholtz 1858). Dieses Postulat war für die Meteorologie, die es permanent mit

dem Entstehen und Vergehen von Luftwirbeln – kleinen lokalen Verwirbelungen wie Windhosen bis hin zu den großen globalen Zirkulationsprozessen – zu tun hatte, nicht nur unbrauchbar. Es führte auch zu eigenartigen Schlussfolgerungen wie die, dass Wirbel in universalen Fluiden wie dem Äther „as permanent as the solid hard atoms assumed by Lucretius“, [as] Kelvin wrote to Helmholtz in a letter in 1867“ seien (Eckert 2006: 20).

Synoptische Wetterkarten

Um sich ein Bild der tatsächlichen Strömungsverhältnisse zu machen, behelfen sich Meteorologen daher mit synoptischen Klima- und Wetterkarten. In diese Karten wurden Messdaten für einen bestimmten Zeitpunkt zusammengetragen und Messungen selben Werts durch Isolinien miteinander verbunden.³ Bereits 1817 nutzte Alexander von Humboldt dieses Verfahren für Temperaturverteilungen und zeichnete eine erste Isothermenkarte. Ab 1863 trug Urban Le Verrier die Luftdruckverteilung in die täglichen Wetterkarten ein. Dabei verband er Orte gleichen Luftdrucks mit Linien, den Isobaren. Diese Karten lieferten eine Zusammenschau klima- oder wetterrelevanter Zustände (Synopsis). Bis zur Erfindung der Telegrafie konnten solche Wetterkarten jedoch erst Monate nach den eigentlichen Messungen hergestellt werden, nachdem die nötigen Daten in meteorologischen Jahrbüchern publiziert waren. Mit

-
- 3 Erste, für die Meteorologie wichtige Messinstrumente waren das 1597 von Galileo Galilei erfundene Wasserthermometer und das 1714 von Daniel Fahrenheit weiterentwickelte Quecksilberthermometer samt Temperaturskala (vgl. Fahrenheit 1714). Hinzu kamen das 1643 von Evangelista Torricelli erfundene Barometer zur Luftdruckbestimmung (vgl. Torricelli 1644) sowie die Entwicklung von Hygrometern zur Messung der Luftfeuchte. Mit diesen Instrumenten wurden ab Mitte des 17. Jahrhunderts vereinzelt Messreihen vor Ort durchgeführt und später durch Messung der Windrichtung und -stärke sowie der Niederschlagsmenge ergänzt. Es wurde jedoch deutlich, dass lokale Messungen mit nicht normierten Instrumenten nicht genügten. Bereits 1667 präsentierte Robert Hooke seine *Method for Making a History of the Weather* der Royal Society in London, deren Ziel die Normierung der Messungen war (vgl. Hooke 1667; Fleming 2002). Ab 1781 nahm die Pfälzische Meteorologische Gesellschaft (Societas Meteorologica Palatina) erstmals weltweit synchrone Messungen vor. Neununddreißig Stationen vom Ural bis Nordamerika führten mit baugleichen Instrumenten zur Mannheimer Stunde um 7, 14 und 21 Uhr Messungen durch und definierten damit einen bis heute gültigen Standard der meteorologischen Messung (vgl. Wege, Winkler 2005). Ende des 19. Jahrhunderts gab es in Europa bereits ein gut ausgebautes Netz an Wettermessstationen und die Resultate wurden telegraphisch weitergegeben.

der Einführung der Telegrafie verbesserte sich die Situation erheblich, denn nun konnten Messwerte schnell und weltweit ausgetauscht werden. „Zum erstenmal wurde der Draht auf der Londoner Weltausstellung 1851 in den Dienst der Meteorologie gestellt, wo man, um die Anwendung der neuen Erfindung zu zeigen, täglich eine, wenn auch bescheidene Wetterkarte geben konnte“ (Schmauß 1942: 40).⁴

Die Synopsis der Beobachtungen war möglich, weil eine neue Darstellung der Daten gefunden worden war. Indem einzelne Messwerte zu Isolinien zusammengefasst wurden, machten sie das Muster der Zustände aktueller Wetterlagen sichtbar. Auf Basis von Erfahrungswissen über ähnliche Wetterlagen und Verteilungsmuster versuchten Meteorologen dann, die weitere Entwicklung des Wetters abzuschätzen. „Der Gewinn aus solchen Verbesserungen kommt aber nur langsam und allmählich,“ schreibt Nils Ekholm 1904, „denn die benützten Methoden sind ja rein empirisch, indem nur durch Sammeln und Vergleichung ähnlicher Fälle ein Fortschritt der Prognosekunst möglich ist. Der berühmte englische Meteorologe Clement Ley schlug ja einst vor, viele tausende von Wetterkarten systematisch zu ordnen, um sie als eine Art Wetter-Wörterbuch zu verwenden. [...] Jede Prognose sollte demnach nur oder doch hauptsächlich in der Angabe einer bestimmten Nummer des Wetter-Wörterbuches bestehen“ (Ekholm 1904: 346, 347). Ein solches Wörterbuch des Wetters für gemäßigte Breiten zu erstellen, erwies sich als schwierig. Denn das Charakteristische der Wetterlagen gemäßigter Breiten ist ihre Veränderlichkeit. Im Unterschied zu den kontinuierlichen Prozessen in den Tropen, zeichnet sich das Wetter in gemäßigten Breiten durch diskontinuierliche Austauschvorgänge von Kälte- und Wärmewellen aus.

Um dennoch Vorhersagen über zukünftige Wetterentwicklungen machen zu können, führten Meteorologen Vergleiche zwischen zwei synoptischen Karten durch, indem sie die beiden Karten auf ein transparentes Papier übertrugen und übereinander legten. Durch die sich verändernden Isolinien wurden so die Veränderung der Wetterlagen sichtbar und es zeigten sich die, „über die Wetterkarte hin und her wandernden Hochs und Tiefs“ (Bjerknes 1938: 50). Verschoob man diese Hochs und Tiefs entsprechend dem bisherigen Muster weiter, so ergab sich eine Prognose für die kommenden Stunden. Dabei durfte das „Intervall zwi-

4 Die Londoner Wetterkarten waren jedoch nur Demonstrationen der Nützlichkeit telegraphierter Informationen. Erst die Einrichtung der telegraphischen Wetterdienste in den 1890er Jahren und Messungen zu festgelegten Zeiten – in Deutschland damals durch die Seewarte Hamburg – lieferten die nötigen Zustandswerte der Atmosphäre, um aussagekräftigere Wetterkarten zu erstellen.

schen zwei sukzessiven synoptischen Karten nicht größer als 12 Stunden sein“ (Ekholm 1904: 349), wollte man einigermaßen aussagekräftige Prognosen erzielen. Allerdings wäre es vorteilhafter gewesen, doch messtechnisch 1904 noch nicht praktikierbar, „das Intervall auf 6 Stunden zu reduzieren, damit die Kontinuität deutlich bemerkbar sei und somit eine nach regulären Methoden auszuführende Interpolation und Extrapolation [als Vorhersage in die Zukunft] möglich sei“ (Ekholm 1904: 349).

Die synoptischen Wetterkarten zu Beginn des 20. Jahrhunderts zeigten jedoch nur unvollständige Momentaufnahmen eines hoch dynamischen Geschehens, dessen zukünftige Entwicklung unter diesen Bedingungen nicht wirklich vorhersagbar war. Zum einen gab es nur Daten bodennaher Messungen, zum anderen waren die Beobachtungsnetze noch nicht ausreichend dicht und wiesen große Lücken über den Meeren oder Kontinenten wie Afrika auf. Die Analyse aufeinander folgender, synoptischer Karten ‚simulierte‘ zwar ein dynamisches Bild meteorologischer Ereignisse in der Atmosphäre. Doch den Meteorologen wurde bald klar, dass diese, sich im Zweidimensionalen darstellenden Ereignisse – sowohl auf der Fläche der Karte wie auch auf bodennaher Ebene der Messungen – nur ein Schnitt durch Vorgänge sind, die sich im Dreidimensionalen abspielen. Man erkannte, „daß Witterungsänderungen meistens mit einer Änderung des ‚Luftkörpers‘ einhergehen. Wenn z.B. nach längerer Schönwetterlage von Westen ein Tief heranrückt, wird die ‚kontinentale Luft‘, die wir bis dahin geatmet haben, ersetzt durch ‚maritime Luft‘, die ihre vom Ozean stammenden Eigenschaften um so unverfälschter mitbringt, je rascher die Ablösung erfolgte“ (Schmauß 1942: 2,3). Diese Luftkörper sind im Grunde nichts anderes als Binnenstrukturen innerhalb der drei globalen Zirkulationsmuster, die bereits von Halley, Hadley, Dove und Ferrel beschrieben wurden. Es bedurfte also eines theoretischen Verständnisses der Atmosphäre als dreidimensionales Objekt und es war notwendig, „die synoptischen Beobachtungen vom zweidimensionalen Raum der Erdoberfläche auf den dreidimensionalen Raum, das Luftmeer“ auszudehnen (Nimführ 1904: 409). Erst im Dreidimensionalen zeigen sich die Ursachen der Veränderungen der Luftmassen. Dazu braucht es ein räumliches, möglichst hoch aufgelöstes Messbild der Atmosphäre. Doch zu Beginn des 20. Jahrhunderts standen nur Ballone und Drachen zur Verfügung, um die Zustände der höheren Luftschichten zu erforschen.⁵ Erst später kamen Luftschiffe und Flugzeuge für aerologische Messungen hinzu.

5 „Wir haben gegenwärtig in dem Drachen und dem Drachenballon zwei neue Forschungsmittel, die es uns ermöglichen, jederzeit bis zu Höhen von 2000 m und darüber die Werte der Wetterfaktoren in der freien Atmosphä-

Eine wichtige Theorie der Luftkörper für die gemäßigten Breiten entstand 1917 mit der Polarfronttheorie von Vilhelm Bjerknes und seines Sohnes Jakob. Die Polarfront markiert, wie in Abbildung 8 dargestellt, die Grenze der polaren Luftmassen, die an Stellen geringen Widerstandes in Form von Kälteeinbrüchen in die gemäßigten Breiten vordringen und zwischen kalten und warmen Luftmassen Tiefdruckgebiete (Zyklonen) verursachen. Die Schematisierung der Zyklonen sowie die Voraussage des dazugehörigen Wetters wurden durch Messungen sowie durch die Beobachtungen struktureller Indikatoren für Veränderungen in den Luftmassen gewonnen. Solche Indikatoren sind Wolken, welche die Bewegungen warmer und kalter Luftmassen zueinander anzeigen. Die Ausarbeitung der theoretischen Grundlagen, die Bjerknes im norwegischen Bergen mit seinen Kollegen vorantrieb, ermöglichte es, bessere Vorhersagen zu erzielen. Rückblickend auf seine Polarfronttheorie formuliert er 1938 die Fortschritte als Resultat der Synopsis:

„Durch die jetzt immer schärfere Wetterkartenanalyse traten die früher nur als Ausnahmereischeinungen beobachteten Diskontinuitätslinien als tägliche Gäste auf den Wetterkarten auf. In dieser Weise wurden allmählich die jetzt so bekannten Tatsachen der ‚Polarfrontmeteorologie‘ oder der ‚Luftmassenmeteorologie‘ gefunden. Man lernte die großen atmosphärischen Diskontinuitätsflächen kennen, die sich, je nach ihrer Bewegungsrichtung, als ‚Kaltfronten‘ oder ‚Warmfronten‘ am Erdboden zu erkennen gaben. Es wurde beobachtet, wie die Zyklonen mit einer wellenförmigen Vertiefung in einer Diskontinuitätsfläche anfangen. Die Vertiefung nahm zu, mit dem Erfolg, daß die ursprüngliche Welle durch das Bergeronsche Okklusionsstadium sich allmählich in einen Horizontalwirbel umbildete. Das Paradoxon von dem Wellenursprung der Zyklonen war aufgeklärt, und die – schwierige – Ausarbeitung der mathematischen Theorie der Zyklonenbildung konnte beginnen. Und schließlich: die praktische Wettervorhersage, die sich auf dieser Grundlage entwickelte, verlief sozusagen von selbst nach dem von Anfang an aufgestellten Programm: die Ortsveränderungen der bewegten Luftmassen zu bestimmen, und die Zustände, in denen sie anlagen“ (Bjerknes 1938: 58, 59). „In den Händen solcher Forscher hat sich die moderne Wetterkarte zu einem grundlegenden – immateriellen – Instrument der Physik der Atmosphäre entwickelt, entsprechend dem materiellen Instrumenten der Laborphysik“ (Bjerknes 1938: 61).

re zu bestimmen. Unter günstigen Umständen kann man, wie die Erfahrung gezeigt hat, schon bis zu Höhen von 5000 m mittelst Drachen Registrierapparate hochbringen“ (Nimführ 1904: 411).

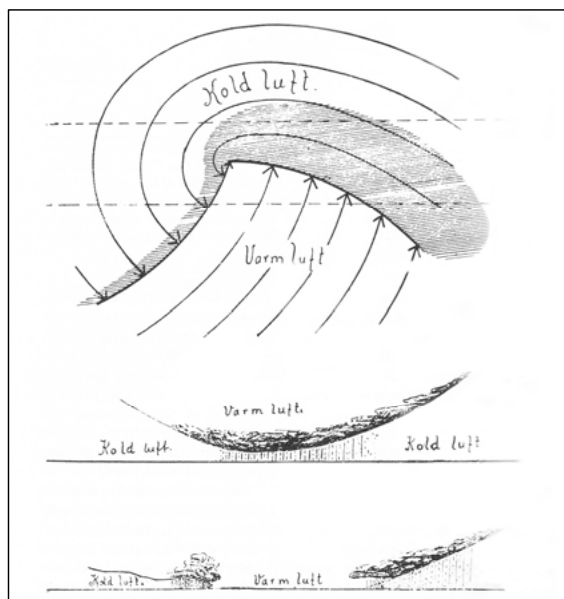


Abbildung 8: Polarfronttheorie (Bjerknes 1919: 128)

Die Wetterkarte als Erkenntnisinstrument markierte den Beginn dreidimensionaler Modelle atmosphärischer Prozesse, auch wenn die Dreidimensionalität sich erst in einzelnen Querschnitten vertikaler Prozesse zeigte, die Messdaten noch dürrig und Modelle noch einfach waren. Dennoch bereite-te diese Entwicklung den weiteren Weg der Meteorologie zu einer dynamischen Meteorologie und einer Physik der Atmosphäre vor.⁶

Vilhelm Bjerknes Konzept einer Physik der Atmosphäre

Obwohl Bjerknes mit der Polarfronttheorie, die sich ab den 1920er Jahren als äußerst erfolgreiche Methode der Wettervorhersage erwies, die

6 Darüber hinaus verbanden die synoptischen Wetterkarten Wetter- und Klimaforschung in neuer Weise miteinander. „Der Wetterdienst hat erkennen lassen, daß die Atmosphäre gewisse konservative Eigenschaften hat, so daß wir gelegentlich an den Bedingungen, die über ganz anderen Gebieten der Erde Geltung haben, teilnehmen; die Klimatologie hat eine Veredelung erfahren, indem man neben den gewohnten und auch notwendigen Mitteln einer Pentade, einer Woche, eines Monats die mittleren Temperaturen, Feuchtigkeiten usw. bestimmter Luftkörper zu bestimmten Zeiten des Jahres berechnen mußte“ (Schmauß 1942: 2).

Meteorologie als Praxis vorangebracht hatte, entsprach diese angewandte Prognostik nicht seinem ursprünglichen Programm einer rationellen Wettervorhersage basierend auf der Meteorologie als exakter Wissenschaft. 1913 hatte er anlässlich seiner Antrittsvorlesung als Professor für Geophysik an der Universität Leipzig sein Ziel, eine Physik der Atmosphäre zu schaffen, formuliert. „Die Physik der Atmosphäre behandelt denselben Gegenstand wie die Meteorologie. Deshalb darf man aber nicht diese Wissenschaften miteinander identifizieren. Der Unterschied wird dadurch gekennzeichnet, daß man die Physik zu den sogenannten exakten Wissenschaften rechnet, während man versucht sein könnte, die Meteorologie als Beispiel einer höchst inexacten Wissenschaft anzuführen. Die Meteorologie wird erst in dem Maße exakt, in dem sie sich zu einer Physik der Atmosphäre wandelt“ (Bjerknes 1913: 4).

Diese Physik der Atmosphäre gründet in den physikalischen Konzepten von Halley, Hadley, Dove und Ferrel sowie in den hydrodynamischen Theorien von Euler, Navier, Stokes, Helmholtz, Kelvin und anderen Forschern. Bjerknes selbst hatte Ende der 1890er Jahre den entscheidenden Durchbruch erzielt, um die Hydrodynamik für meteorologische Anwendungen fruchtbar zu machen. Bei seinen Bemühungen, die idealisierten Gleichungen für kompressible Fluide zu erweitern, stieß er auf mathematische Probleme.⁷ „Attractive and repulsive phenomena between the fluid bodies seemed to occur with an accompanying production of vortices in the boundary layer between the fluid bodies and the surrounding fluid. This result contradicted the well-established theorems of Helmholtz and Lord Kelvin which claimed vortex motions and circulations in frictionless, incompressible fluids are conserved“ (Friedman 1989: 19). Indem Bjerknes die Annahmen von Helmholtz und Kelvin für kompressible Fluide in Frage stellte, postulierte er sein allgemeines Zirkulationstheorem. Dieses Theorem besagt, dass die Dichte eines Fluids von verschiedenen Variablen wie Feuchtigkeit, Temperatur als auch Druck bestimmt sein konnte, oder mathematisch formuliert: Die Dichte war nicht nur eine Funktion des Drucks, sondern auch anderer Faktoren (vgl. Bjerknes 1898, 1900). Als er im März 1897 und im Februar 1898 sein Zirkulationstheorem in der Physikalischen Gesellschaft in Stock-

7 Es war ein Glücksfall für die Meteorologie, als sich Vilhelm Bjerknes, von Hause aus Physiker, zu Beginn der 1890er Jahre mit den hydrodynamischen Gleichungen beschäftigte. Sein Ziel war es, die hydrodynamischen Gleichungen für die Elektrodynamik fruchtbar zu machen. Er hatte 1890 und 1891 Heinrich Hertz bei seinen elektromagnetischen Experimenten assistiert und wurde 1895 als Professor für Angewandte Mechanik und Mathematische Physik nach Stockholm gerufen.

holm präsentierte, erkannten die dort anwesenden Meteorologen Svante Arrhenius und Nils Ekholm sofort die Bedeutung von Bjerknes Konzept für die Meteorologie. Denn damit war es möglich geworden, das Entstehen und Vergehen von Strömungen in kompressiblen Fluiden, wie sie in der Atmosphäre vorkommen, zu erklären und mathematisch konzeptuell handhabbar zu machen. Bereits im Frühjahr 1900 wurden Bjerknes revolutionäre Ideen über *Das dynamische Prinzip der Cirkulationsbewegung in der Atmosphäre* in der Meteorologischen Zeitschrift veröffentlicht. Er leitet seinen Artikel wie folgt ein:

„Die hydrodynamischen Bewegungsgleichungen erhalten ohne Zweifel den Schlüssel zu dem Verständnis atmosphärischer Bewegungen. Man begegnet aber der grossen Schwierigkeit, dass man die Integrale dieser Gleichungen nicht darstellen kann für die in der Atmosphäre vorliegenden complicirten Verhältnisse. Um deshalb in der Meteorologie rationelle dynamische Methoden einzuführen, muss man versuchen, einen solchen Weg einzuschlagen, dass man die in diesen Gleichungen enthaltenen dynamischen Principien in Verwendung bringt, ohne nöthig zu haben, die Gleichungen integrieren zu müssen. Dabei wird man kaum einen besseren Weg einschlagen können als denjenigen, welchen v. Helmholtz und Lord Kelvin betreten haben, [...] aber unter der Voraussetzung von Eigenschaften, die denjenigen der natürlichen Flüssigkeiten näher kommen, um [...] die Gesetze der Bildung und der Vernichtung der atmosphärischen Cirkulations- und Wirbelbewegungen zu erhalten. [...] 1. Man geht mit v. Helmholtz und Lord Kelvin von den Bewegungsgleichungen für reibungslose Flüssigkeiten aus, führt aber im Verlaufe der Rechnung keine beschränkenden Voraussetzungen in Bezug auf die Dichtigkeit der Flüssigkeit ein. 2. Man entwickelt die entsprechenden Sätze, indem man von den Bewegungsgleichungen der reibenden Flüssigkeiten ausgeht. [...] 3. Man bezieht alle Sätze auf ein rotierendes Koordinatensystem, um in den Anwendungen nur die Cirkulations- oder Wirbelbewegungen relativ zu der rotierenden Erde betrachten zu brauchen“ (Bjerknes 1900: 12, 13).

Als Bewegungsursache werden in Bjerknes mathematischem Modell die temperaturbedingten Dichteunterschiede berücksichtigt, welche darüber hinaus durch die Rotation der Erde sowie durch die Reibung der Partikel modifiziert werden. Bjerknes erläuterte in seinem umfangreichen Artikel ausführlich, wie er das Konzept von Helmholtz und Kelvin mathematisch erweitert und wie er die Dynamik des von ihm konzipierten Modells geometrisch konstruiert, um letztendlich berechenbare Resultate zu erhalten. Dazu stellte er sich Flächen gleichen Drucks (isobare Flächen) mit einem senkrecht zur isobaren Fläche stehenden Gradienten abnehmenden Drucks vor. Analog postuliert er Flächen gleichen spezifischen Volumens (isostere Flächen) mit einem Beweglichkeitsvektor der sich

verändernden spezifischen Volumen, da die Beweglichkeit mit wachsendem spezifischem Volumen zunimmt.⁸ Er stellte fest, dass isobare wie auch isostere Flächen entweder gegen sich selbst zurücklaufen und Kurven bilden oder an der Grenzfläche der Flüssigkeit enden, nie aber in der Flüssigkeit abrupt abbrechen. Außerdem können sich isobare Flächen unterschiedlichen Drucks nicht schneiden. Selbiges gilt für isostere Flächen. Wäre wie bei Helmholtz die Dichte nur eine Funktion des Drucks, dann würden sich auch die isobaren und isosteren Flächen nie schneiden. In Bjerknes Modell ist die Dichte bzw. das spezifische Volumen der Luft jedoch nicht nur eine Funktion des Drucks, sondern auch der Temperatur und, allerdings vernachlässigbar, der Feuchtigkeit. Daher können sich die isobaren und isosteren Flächen schneiden und isobare-isostere Röhren bilden. „Vorausgesetzt, dass wir [...] Einheiten passender Grössenordnungen benutzen, werden wir die entsprechenden als infinitesimal aufzufassenden Einheitsröhren Solenoide nennen. Die Querschnitte der grösseren isobare-isosteren Röhren haben die Form von krummlinigen Vierecken, die Querschnitte der Solenoide sind gradlinige Parallelogramme“ (Bjerknes 1900: 103).⁹ Der Vorteil dieser Einheitsröhren oder Solenoide ist, dass sich mit ihnen nun die dynamischen Bedingungen einer Zirkulation geometrisch untersuchen lassen. Bjerknes zeigt, dass der Zuwachs der Zirkulation in einer Flüssigkeit der Anzahl der Solenoide entspricht, die durch die geschlossene Kurve von Flüssigkeitspartikeln umschlossen wird.¹⁰ „Zu beachten ist dann, dass wo die

-
- 8 „Die Beschleunigung, welche der Gradient einem Partikelchen der Flüssigkeit mittheilt, hängt von der Trägheit, das heisst von der Dichte des Partikelchens ab: sie ist gleich dem Gradienten dividirt durch die Dichte; oder noch einfacher: sie ist gleich dem Gradienten multiplicirt mit dem specifischen Volumen k des betreffenden Flüssigkeitselements. Um die Vertheilung der auf dem Druck beruhenden Beschleunigung angeben zu können, genügt es deshalb, ausser der Druckvertheilung zugleich die Vertheilung des specifischen Volumens in der Flüssigkeit zu nennen“ (Bjerknes 1900: 102).
 - 9 Den Begriff Solenoide übernimmt Bjerknes aus der Elektrodynamik. Dort bezeichnet dieser einen elektromagnetischen Induktionsgenerator. Die Einheitsgröße ergibt sich aus der Wahl der Eins für Druckunterschiede der isobaren Flächen. „Durch die zweckmäßige Wahl der Einheit kann man dennoch immer erreichen, dass die isobaren Flächen hinlänglich nahe aneinander verlaufen, um in befriedigender Vollständigkeit die Druckvertheilung in der Flüssigkeit wiederzugeben“ (Bjerknes 1900: 102).
 - 10 Idealer Weise ergeben in einem genügend kleinen Teil der Flüssigkeit die Querschnitte der Solenoide ein System von kongruenten Parallelogrammen, d.h. der Druckgradient und der Beweglichkeitsvektor haben überall eine unveränderliche Größe und Richtung. Da aber das spezifische Volumen und damit die Beschleunigung der Flüssigkeitsteilchen von Punkt zu Punkt unterschiedlich sind, werden die Teilchen anfangen zu rotieren:

Temperatur hoch ist, das spezifische Volumen der Luft grösser ist, und wo die Temperatur niedrig ist, das spezifische Volumen kleiner ist, als man es nach dem Werth des Druckes erwartet. [...] Die isothermen Flächen müssen also von den isobaren abweichen, und zwar immer in der Weise, dass sie in den heißen Gegenden niedriger, in den kalten höher als die entsprechenden isobaren Flächen liegen. Die beiden Flächenschaaren müssen also einander nothwendig schneiden und Solenoide bilden, welche Cirkulationsbewegungen der Luft erzeugen“ (Bjerknes 1900: 145). Bei Kenntnis der tatsächlichen Druck- und Temperaturschwankungen, so Bjerknes, lässt sich auf diese Weise die Zirkulation berechnen. Da es ihm um eine rationelle dynamische Methode geht, welche die in den hydrodynamischen „Gleichungen enthaltenen dynamischen Principien in Verwendung bringt“ (Bjerknes 1900: 12), hofft er, diese Methode auch für die Wettervorhersage nutzen zu können. „Aus der Anzahl der Solenoide wird man schließen können, in wie weit der Wind in der nächsten Zukunft an Intensität zu- oder abnehmen wird. Alles wird zuletzt nur davon abhängen, ob man hinlänglich viele systematische Beobachtungen aus den höheren Luftschichten erhalten kann“ (Bjerknes 1900: 158).¹¹

Damit legte Bjerknes den Grundstein einer Physik der Atmosphäre. Doch erst mit seinem Konzept, das er in dem Artikel *Das Problem der Wettervorhersage, betrachtet vom Standpunkt der Mechanik und der Physik* im Januar 1904 vorstellt, beschreibt er die Physik der Atmosphäre, wie sie bis heute Grundlage der Meteorologie ist. Dabei appelliert Bjerknes an das deterministische Wissenschaftsverständnis wie es für die Physik als exakte Wissenschaft obligatorisch ist. „Wenn es sich so verhält, wie jeder naturwissenschaftlich denkende Mann glaubt, daß sich die späteren atmosphärischen Zustände gesetzmäßig aus den vorhergehenden entwickeln, so erkennt man, daß die notwendigen und hinreichenden Bedingungen für eine rationelle Lösung des Prognoseproblems der Meteorologie die folgenden sind: 1. Man muß mit hinreichender Genauigkeit den Zustand der Atmosphäre zu einer gewissen Zeit kennen. 2. Man muß mit hinreichender Genauigkeit die Gesetze kennen, nach

geometrisch ist dies als Zirkulation der aus den Teilchen bestehenden geschlossenen Kurven dargestellt.

- 11 „Zuletzt wird die Theorie auch ihre Anwendbarkeit behalten, wenn man die Atmosphäre und das Meer zusammen als ein einziges flüssiges Medium betrachtet. Dies ist von grosser Bedeutung wegen der ausgedehnten Wechselwirkungen zwischen den Bewegungen der Luft und des Meeres“ (Bjerknes 1900: 158). Heutige Wetter- und Klimamodelle basieren auf der Hydrodynamik der Atmosphäre wie auch der Ozeane.

denen sich der eine atmosphärische Zustand aus dem anderen entwickelt“ (Bjerknes 1904: 1). Auch wenn Bjerknes dabei allzu optimistisch von einer „vollständigen Diagnose des Zustandes der Atmosphäre“ (Bjerknes 1904: 1) in näherer Zukunft ausging, so zeichnete er ein klares Bild der Gesetzmäßigkeiten atmosphärischer Prozesse, wie sie bis heute jedem Wetter- und Klimamodell zugrundeliegen:

„Die atmosphärischen Prozesse sind gemischte Vorgänge mechanischer und physikalischer Natur. Für jeden einzelnen dieser Vorgänge können wir nach mechanischen oder physikalischen Prinzipien eine oder mehrere mathematische Gleichungen aufstellen. Die genügende Kenntnis der Gesetze, nach welchen sich die atmosphärischen Prozesse entwickeln, haben wir, wenn wir in dieser Weise ebenso viele voneinander unabhängige Gleichungen aufschreiben können, als unbekannte Größen zu berechnen sind. Der Zustand der Atmosphäre zu einer beliebigen Zeit wird in meteorologischer Hinsicht bestimmt sein, wenn wir zu dieser Zeit in jedem Punkt die Geschwindigkeit, die Dichte, den Druck, die Temperatur und die Feuchtigkeit der Luft berechnen können. Als Vektor wird die Geschwindigkeit durch drei skaläre Größen, die drei Geschwindigkeitskomponenten, dargestellt, und es handelt sich deshalb um die Berechnung von 7 unbekannten Größen“ (Bjerknes 1904: 2).

Um die sieben meteorologischen Variablen berechnen zu können, benötigt man die drei hydrodynamischen Bewegungsgleichungen, die Kontinuitätsgleichung der Erhaltung der Masse, die Zustandsgleichung der Atmosphäre sowie die beiden Hauptsätze der mechanischen Wärmetheorie. Die drei hydrodynamischen Bewegungsgleichungen sind „Differentialrelationen zwischen den drei Geschwindigkeitskomponenten, der Dichte und dem Druck. [...] Die Kontinuitätsgleichung, welche das Prinzip von der Erhaltung der Masse während der Bewegung ausspricht [...] ist wieder eine Differentialrelation und zwar zwischen den Geschwindigkeitskomponenten und der Dichte. [Ebenso] die Zustandsgleichung der atmosphärischen Luft, welche eine Relation in endlicher Form zwischen Dichte, dem Druck, der Temperatur und der Feuchtigkeit einer beliebigen Luftmasse ist“ (Bjerknes 1904: 2). Die beiden Hauptsätze der mechanischen Wärmetheorie lassen sich ebenfalls als Differentialgleichungen schreiben und geben an, wie sich die Energie und die Entropie einer Luftmasse durch die Zustandsänderungen in der Atmosphäre verändern.¹² Für die Berechnung dieser sieben Zustandsvariablen der At-

12 „Auch durch diese Gleichungen werden keine neuen Unbekannten in dem Probleme eingeführt, denn die Energie und Entropie drücken sich durch dieselben Veränderlichen aus, welche in der Zustandsgleichung eingehen und setzen die Änderungen dieser Größen mit der Änderung anderer, als bekannt anzusehenden Größen in Verbindung. Diese anderen Größen sind

mosphäre ergeben sich sieben, voneinander unabhängige Gleichungen. Alle Gleichungen, mit Ausnahme der Zustandsgleichung, sind partielle Differentialgleichungen. Das sich daraus zusammensetzende Gleichungssystem ist jedoch zu komplex, als dass es sich analytisch lösen ließe. Hier endete Bjerknes Optimismus, den er bezüglich der Möglichkeit flächendeckender Messungen der Atmosphäre in naher Zukunft hegte:

„Schon die Berechnung dreier Punkte, die sich nach einem so einfachen Gesetze wie dem Newtonischen gegenseitig beeinflussen, übersteigt bekanntlich weit die Hilfsmittel der heutigen mathematischen Analyse. Für die unter weit komplizierteren Wechselwirkungen vor sich gehenden Bewegungen sämtlicher Punkte der Atmosphäre ist dann selbstverständlich nichts zu hoffen. Die exakte analytische Lösung würde aber, selbst wenn wir sie aufschreiben könnten, auch nicht das geben, was wir brauchten. Denn um praktisch nützlich zu sein, muß die Lösung vor allem übersichtliche Form haben und deshalb unzählige Einzelheiten unbeachtet lassen, die in jede exakte Lösung eingehen würden. Die Vorhersage darf sich also nur mit Durchschnittsverhältnissen über größere Strecken und für längere Zeiten beschäftigen, sagen wir beispielsweise für Meridiangrad zu Meridiangrad und von Stunde zu Stunde, nicht aber von Millimeter zu Millimeter und von Sekunde zu Sekunde“ (Bjerknes 1904:2).

Bjerknes Einschätzung, dass man auf eine analytische Lösung der komplexen Wechselwirkungen des Vielteilchensystems der Atmosphäre nicht hoffen kann, trifft bis heute zu. Eine analytische Lösung gibt es nicht, und die Computersimulation stellt lediglich die numerische Approximation der unbekannten, analytischen Lösung für ein definiertes Raum-Zeitgitter dar. Allerdings trifft Bjerknes Vermutung, dass die Berücksichtigung zu vieler Einzelheiten ohne größeren Nutzen sei, nicht zu und lässt sich allein aus den beschränkten Berechnungsmethoden der damaligen Zeit erklären. Heutige Modelle verbessern sich gerade in ihrer Detailliertheit in Form höherer raumzeitlicher Auflösungen und subskaliger Parametrisierungen. Die computergestützten Rechenmethoden und Auswertungsmöglichkeiten erlauben es, aus der Masse an Einzeldaten Durchschnittsverhältnisse zu errechnen. Doch zu Beginn des 20. Jahrhunderts waren die Meteorologen auf einige wenige Berechnun-

erstens die von der Luftmasse ausgeführte Arbeit, welche durch dieselben Veränderlichen bestimmt ist, die in den dynamischen Gleichungen eingehen, zweitens die von außen aufgenommenen oder die nach außen abgegebenen Wärmemengen, welche durch die physikalischen Daten über Ein- und Ausstrahlung sowie über die Erwärmung der Luft bei Berührung mit der Erde gegeben sein werden (Bjerknes 1904: 2).

gen per Hand angewiesen. Die Dynamik der Atmosphäre war noch nicht durch ihre Mechanik und Physik für einzelne Variablenpunkte auflösbar und berechenbar. Es fehlte nicht nur an Rechenkapazitäten und Messdaten, sondern an praktikablen Umsetzungskonzepten und messtechnischen Standardisierungen. Bjerknes selbst versuchte zwar ab 1913 als Direktor des geophysikalischen Instituts der Universität Leipzig seine rationelle dynamische Methode anzuwenden und mit Hilfe graphischer Rechenmethoden für Wettervorhersagen nutzbar zu machen. Bereits 1911 war ihm klar: „The development of proper graphical methods for performing these operations directly upon the charts will be of the same importance for the progress of dynamic meteorology and hydrography as the methods of graphical statistics and of graphical dynamics have been for the progress of technical sciences“ (Bjerknes 1911: 69). Doch aufgrund mangelnder Rechenkapazitäten musste er sein Konzept einer Physik der Atmosphäre mit qualitativen Methoden kombinieren oder gar durch solche ersetzen. „Ideally, he claimed [in 1919], the prognostic problem could be solved mathematically with the help of mechanics and thermodynamics; practical meteorological methods could perhaps be devised that qualitatively use the knowledge implicit in the mechanical and thermodynamical equations“ (Friedman 1989: 157).

Berechenbare Modelle der Atmosphäre

Bjerknes lieferte 1904 ein mathematisches Modell der Physik der Atmosphäre in Form eines Systems aus sieben Gleichungen für die sieben meteorologischen Variablen der Dichte, der Feuchtigkeit, des Drucks, der Temperatur sowie der Geschwindigkeit der Luft in drei Richtungen. Das Gleichungssystem beschreibt dabei den Zustand der Luftmassen (Dichte, Druck, Temperatur, Feuchte), ihre Bewegung (Geschwindigkeitskomponenten, Dichte, Druck), die Massenerhaltung während der Bewegung (Geschwindigkeitskomponenten, Dichte) sowie die Veränderung der Energie und Entropie der Zustandsänderungen der Luftmassen (Variablen im Zusammenhang mit der von den Luftmassen ausgeführten Arbeit sowie den aufgenommenen und abgegebenen Wärmemengen durch solare Ein- und Ausstrahlung und vom Boden aufgenommener Energie). Da dieses mathematische Modell sich analytisch nicht lösen lässt, bedarf es eines praktikablen Rechenschemas.¹³ Dazu muss das Ge-

13 Sein Programm einer Wettervorhersage, wie er es in der Bergen-Schule ab 1917 entwickelte, wich aus pragmatischen Gründen immer mehr von seinem 1904 formulierten Ansatz ab. Erst mit der Erfindung des Computers

samtproblem der rationellen Vorhersage, basierend auf diesem System der sieben Gleichungen, in Teilprobleme zerlegt werden, die dadurch rechnerisch handhabbar werden. „Zu rechnerischen Zwecken kann man die gleichzeitigen Variationen mehrerer Veränderlichen durch aufeinander folgende Variationen der einzelnen Veränderlichen oder einzelner Gruppen der Veränderlichen ersetzen. [...] Behält man die endlichen Intervalle bei, so kommt man auf die Annäherungsmethode der endlichen Differenzenrechnung“ (Bjerknes 1904: 4). Die Ausführung dieser Differenzenrechnung des Modells ist nichts anderes als die numerische Simulation gemäß eines schrittweise abarbeitbaren Schemas – ob per Hand oder ab den 1940er Jahren mit Hilfe automatischer Rechenmaschinen. Allerdings lässt sich das Gesamtproblem nicht in beliebiger Weise zerlegen. Bjerknes weist darauf hin, dass die Gruppierung der Veränderlichen erhalten bleiben muss. Das Resultat einer solchen Unterteilung müssen mathematisch und physikalisch wohldefinierte Teilprobleme sein, die „einer natürlichen Teilungslinie im Hauptproblem folgen. Eine solche Teilungslinie lässt sich auch angeben. Sie folgt der Grenzlinie zwischen den speziell dynamischen und den speziell physikalischen Prozessen, aus welchen die atmosphärischen Prozesse zusammengesetzt sind“ (Bjerknes 1904: 4). Dieser Grenzlinie folgend ergibt sich die Zerlegung in rein thermodynamische sowie hydrodynamische Teilprobleme, indem man das Schranier zwischen beiden Teilen – die Zustandsgleichung, welche die Dichte, den Druck, die Temperatur und die Feuchte der Luftmassen beschreibt – kappt. Würde man jedoch dabei aus Vereinfachungsgründen die Temperatur und Feuchtigkeit eliminieren – wie dies von den Hydrodynamikern vor Bjerknes Zirkulationstheorem gemacht wurde, um die thermodynamischen Prozesse nicht explizit berücksichtigen zu müssen – dann würde die Dichte nur vom Druck abhängen, wie in Helmholtz’ und Kelvins mathematischen Modellen. Doch die Physik der Atmosphäre erfordert gerade die Berücksichtigung dieser Variablen für eine realistische Formulierung des Vorhersageproblems. Daher schlägt Bjerknes vor, „anstatt die Temperatur und die Feuchtigkeit aus der Zustandsgleichung ganz verschwinden zu lassen, können wir sie aber für kürzere Zeitintervalle als gegebene Größen ansehen, mit Werten, welche entweder aus den Beobachtungen oder aus den vorhergehenden Rechnungen hervorgegangen sind. Ist das dynamische Problem für dieses Zeitintervall gelöst, so berechnet man nachher nach rein thermodynamischen Methoden neue Werte von Temperatur und Feuchtigkeit. Diese sieht man als gegebene Größen an, wenn man

rückte Bjerknes Konzept einer rationellen Wettervorhersage basierend auf Berechnungen wieder in greifbare Nähe.

das hydrodynamische Problem für das nächste Zeitintervall löst und so weiter“ (Bjerknes 1904: 5).

Die hydrodynamischen Gleichungen sind die eigentlichen prognostischen Gleichungen, da nur sie die Zeit als unabhängige Variable beinhalten. Für ihre Berechnung schlägt Bjerknes eine graphische Berechnungsmethode vor, indem für bestimmte Berechnungspunkte eine Prognose mit Hilfe der Parallelogrammkonstruktion ermittelt wird. Allerdings gilt es, die Beschränkungen der Bewegungsfreiheit dieser graphischen Verschiebungen durch die Kontinuitätsgleichung sowie Grenzbedingungen wie die Topographie des Bodens zu berücksichtigen. Auch wenn Bjerknes, wie er 1904 schrieb, „keine großen mathematischen Schwierigkeiten“ bei der graphischen Berechnung der Hydrodynamik erwartete, so weist er darauf hin, dass die unvollständige Kenntnis des Reibungswiderstandes der Luft eine empfindliche Lücke in der Kenntnis der atmosphärischen Zustände sei.¹⁴ Auch bezüglich der thermodynamischen Zustände, welche die Verteilung von Temperatur und Feuchtigkeit bestimmen, sieht er kein Berechnungsproblem. Aber hier liegt ebenfalls eine unvollständige Kenntnis verschiedener Faktoren vor, beispielsweise bezüglich der Wärmemengen, welche die Luftmassen durch solare Ein- und Ausstrahlung erhalten, aber auch durch den Austausch mit der Oberfläche der Ozeane. Generell ist Bjerknes optimistisch, dass sich sein komplexes Modell graphisch berechnen lässt. „Wenn die graphischen Methoden fertig ausgearbeitet vorliegen und die nötigen tabellari-schen Hilfsmittel zuwege gebracht sind, so werden sich wahrscheinlich auch die einzelnen Operationen leicht ausführbar zeigen“ (Bjerknes 1904: 6). Die einzige Frage, die es dann noch zu klären gilt, ist die zeitliche und räumliche Auflösung der Berechnungen. Je höher die Auflösung ist, desto mehr Berechnungen müssen ausgeführt werden. Ist die Auflösung zu gering, sind die Resultate wenig aussagekräftig. Bjerknes geht von einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde und einer räumli-

14 „Die Reibung hängt von den Geschwindigkeitsdifferenzen im unendlich Kleinen ab, während die Meteorologen gezwungen sind, mit den Durchschnittsbewegungen ausgedehnter Luftmassen zu rechnen. Man kann deshalb nicht die Reibungsglieder der hydrodynamischen Gleichungen unter Anwendung der in den Laboratorien gefundenen Reibungskoeffizienten benutzen, sondern man muß empirische Resultate über den effektiven Widerstand gegen die Bewegung der großen Luftmassen hinzuziehen. Hinlängliche Daten dieser Art besitzt man aber schon, um die ersten Versuche mit der Vorausberechnung von Luftbewegungen anzustellen“ (Bjerknes 1904: 5, 6).

chen Auflösung von einem Meridiangrad aus, denn schneller, so Bjerknes, würden sich die Luftmassen selten bewegen.¹⁵

Bjerknes Optimismus hinsichtlich der praktischen Berechenbarkeit seines mechanisch-physikalischen Modells der Atmosphäre bestätigte sich in den darauf folgenden Jahren nicht. Zum einen mangelte es an Messdaten, zum anderen wurde die graphische Berechnungsmethode des Wetters, wie 1904 vorgeschlagen, von Bjerknes nie voll entwickelt. Noch 1913, als er seine Professur für Geophysik in Leipzig antrat, war es sein Ziel, „alle mathematischen Rechenoperationen zu graphischen Operationen mit den Karten um[zu]formen. Wir haben uns in dieser Weise die Anfangsgründe einer graphischen Mathematik entwickelt, durch die wir die eine Karte aus der anderen ableiten, genau wie man sonst durch Rechnung die eine Gleichung aus der anderen ableitet“ (Bjerknes 1913: 16).¹⁶ Doch 1938 musste Bjerknes eingestehen, dass „die Ortsveränderungen der bewegten Luftmassen zu bestimmen, und die Zustände in denen sie angelangt [in der Praxis der Wettervorhersage] nach schnellen Schätzungen, nicht durch jahrelange Berechnungen, die ich bei meiner Antrittsrede in Leipzig in Aussicht gestellt hatte“ erfolgte (Bjerknes 1938: 59). Das „Bild der zukünftigen [atmosphärischen] Zustände zu konstruieren“ (Bjerknes 1904: 7), auf Basis des aktuellen physikalischen Zustandsbildes, wurde zuerst durch die Synopsis gepaart mit Beobachtungen möglich und erst wesentlich später mit dem Aufkommen leistungsfähiger Computer durch berechenbare Modelle.

15 Die Frage nach der Auflösung wird zu einer entscheidenden Frage der numerischen Simulation werden. Doch zu Beginn gibt es kaum Erfahrungswerte über eine adäquate zeitliche und räumliche Auflösung, geschweige denn stündlich erhobene Messwerte. In einem Artikel vom August 1904 geht Nils Ekholm für die zeitliche Diskretisierung von Luftdruckprognosen auf Basis synoptischer Karten von einem zwölf Stunden Intervall aus (vgl. Ekholm 1904). Und in einem Artikel vom September desselben Jahres weist R. Nimführ auf die Notwendigkeit hin, „auch die Wetterfaktoren aller umliegenden Wetterräume bis zur Grenze der in Betracht kommenden Wetterzone“ bei einer quantitativen Wetterprognose zu berücksichtigen (Nimführ 1904: 408).

16 „Ich würde aber mehr als froh sein, wenn ich die Arbeit soweit führen könnte, daß ich durch jahrelange Rechnungen das Wetter von nur einem Tage auf den anderen ausrechnen könnte. Wenn nur die Rechnung stimmte, so wäre der wissenschaftliche Sieg errungen. Die Meteorologie wäre dann eine exakte Wissenschaft, eine wirkliche Physik der Atmosphäre geworden“ (Bjerknes 1913: 13, 14).

Dennoch versuchte Lewis Fry Richardson in den 1910er Jahren ein numerisches Wettermodell per Hand zu berechnen.¹⁷ „The fundamental idea is that atmospheric pressures, velocities, etc. should be expressed as numbers, and should be tabulated at certain latitudes, longitudes and heights, so as to give a general account of the state of the atmosphere at any instance, over an extended region, up to the height of say 20 kilometers. [...] It is shown that there is an arithmetical method of operating upon these tabulated numbers, so as to obtain a new table representing approximately the subsequent state of the atmosphere after a brief interval of time, dt say. The process can be repeated so as to yield the state of the atmosphere after $2dt$, $3dt$ and so on“ (Richardson 1922: 1). 1922 beschreibt Richardson auf über zweihundert Seiten in seinem Buch *Numerical Weather Prediction*, wie die schrittweisen Berechnungen auszuführen sind: „But whereas Prof. Bjerknes mostly employs graphs, I have thought it better to proceed by way of numerical tables. The reason for this is that a previous comparison of the two methods, in dealing with differential equations, had convinced me that the arithmetical procedure is the more exact and more powerful in coping with otherwise awkward equations“ (Richardson 1922: VIII). Um sein Modell zu berechnen, wählte Richardson ein Berechnungsgitter, dessen Abstand der Berechnungspunkte voneinander dem realen Abstand von 130 Kilometern nahe kam. Dies entsprach der damaligen Verteilung der zweiunddreißig Messstationen in Großbritannien, würde man sie jeweils ins Zentrum eines Polygons des Berechnungsgitters setzen. Tatsächlich waren die Stationen jedoch unregelmäßig verteilt. Für die vertikale Verteilung wählte er sieben Schichten. Damit erhielt er ein dreidimensionales Berechnungsmodell, welches den Zustand der Luftmassen in deren horizontalen wie auch vertikalen Veränderungen darstellte. Für die zeitliche Diskretisierung richtete sich Richardson ebenfalls nach dem damals aktuellen Standard von 12-stündlichen Messungen. Trotz der detaillierten Überlegungen bezüglich des mathematischen Modells, der vertretbaren Vereinfachungen sowie möglicher Fehlerquellen gelang es Richardson nicht, eine akkurate Vorhersage für ein einfaches Beispiel wie die Veränderung des Luftdrucks innerhalb von sechs Stunden zu berechnen. Obwohl er mehr als sechs Wochen damit zubachte, die Berechnungs-

17 Richardson arbeitete die Berechnungen während seiner Dienstzeit als Sanitäter im ersten Weltkrieg aus. „In his spare time in France he set up and designed various simple meteorological instruments and took readings. Also, he had brought along the first draft of his book on numerical weather prediction, and during a six-week period he worked on a specific calculation [...] to show how the numerical forecasting system might be used in practice“ (Hunt 1997: XIX).

schritte auszuarbeiten und die einzelnen Berechnungen durchzuführen, lag seine Prognose von 145 hPa Luftdruckänderung um das fünfzigfache über der tatsächlich gemessenen Luftdruckänderung. Die unzureichenden und ungenauen Messdaten zur Initialisierung seiner Berechnungen waren ein Grund für sein Scheitern.¹⁸ Dennoch demonstrierte Richardson eindrucksvoll die Prinzipien der numerischen Wettervorhersage, wie sie später mit den Computermodellen zum Alltag wurde. Dabei ging seine Vorstellung so weit, dass er sich eine Wettervorhersagefabrik ausmalte, in welcher 64.000 menschliche Computer parallel das Wetter von morgen berechnen sollten. Seine Vision beschreibt dabei recht zutreffend die Arbeitsweise heutiger Parallelrechner:

„Imagine a large hall like a theatre except that the circles and galleries go right round through the space usually occupied by the stage. The walls of this chamber are painted to form a map of the globe. The ceiling represents the north polar regions, England is in the gallery, the tropics in the upper circle, Australia on the dress circle and the antarctic in the pit. A myriad computers are at work upon the weather of the part of the map where each sits, but each computer attends only to one equation or part of an equation. The work of each region is coordinated by an official of higher rank. Numerous little ‚night signs‘ display the instantaneous values so that neighboring computers can read them. Each number is thus displayed in three adjacent zones so as to maintain communication to the North and the South on the map. From the floor of the pit a tall pillar rises to half the height of the hall. It carries a large pulpit on its top. In this sits the man in charge of the whole theatre; he is surrounded by several assistants and messengers. One of his duties is to maintain a uniform speed of progress in all parts of the globe. In this respect he is like the conductor of an orchestra in which the instruments are slide-rules and calculating machines. But instead of waving a baton he turns a beam of rosy light upon any region that is running ahead of the rest, and a beam of blue light upon those who are behindhand. Four senior clerks in the central pulpit are collecting the future weather as fast as it is being computed, and dispatching it by pneumatic carrier to a quiet room. There it will be coded and telephoned to the radio transmitting station“ (Richardson 1922: 219).

18 „Richardson ascribed the unrealistic value of pressure tendency to errors in the observed winds which resulted in spuriously large values of calculated divergence. This is true as far as it goes. However, the problem is deeper [...] A subtle state of balance exists in the atmosphere between the pressure and wind fields, ensuring that the high frequency gravity waves have much smaller amplitude than the rotational part of the flow. Minor errors in observational data can result in a disruption of the balance, and cause large gravity wave oscillations in the model solution“ (Lynch 1999: 15).

Richardsons Computerschema zur Berechnung eines relativ komplexen Modells der Wetterentwicklung demonstrierte trotz Fehlprognose die Machbarkeit der numerischen Wettervorhersage. Fortschritte in der Differenzenmethode, also der diskreten Approximation von Differentialgleichungen, bilden die mathematische Grundlage hierfür. Entwickelt wurde die Differenzenmethode erstmals 1759 von Joseph Luis Lagrange.¹⁹ Gleich zu Anfang schreibt Richardson: „Finite arithmetical differences have been proved remarkably successful in dealing with differential equations“ (Richardson 1922: 1). Das ist auch der Grund, warum er sich gegen eine graphische Berechnungsmethode im Sinne Bjerknes entscheidet und für die numerische plädiert.²⁰ Doch der Mangel an Rechenkraft limitierte seine Möglichkeiten derart, dass die numerische Methode zu diesem Zeitpunkt nicht ernsthaft für die Wetterprognose in Betracht gezogen werden konnte. Erst dreißig Jahre später mit dem Aufkommen der ersten automatischen Rechenmaschinen gewinnt die numerische Prognose an Bedeutung. Bereits 1954 in Schweden und ab 1955 in den USA beginnt die Ära der numerischen, computerbasierten Wettervorhersage.

Von Wetter- zu Klimamodellen

Am Beginn der computerbasierten Modellierung atmosphärischer Phänomene stehen nicht die Klimamodelle, sondern einfache Wettermodelle. Im August 1946 traf sich auf Einladung von John von Neumann eine Gruppe US-amerikanischer und skandinavischer Meteorologen am IAS Institute for Advanced Study in Princeton.²¹ Von Neumann, der am Bau

-
- 19 Herman Goldstine schreibt in seiner historischen Analyse des Calculus: „I am not able to find in Euler any suggestion that his method for finding a root of an algebraic equation is intimately related to linear difference equations. It appears that Lagrange was the first to have made the connection. In fact, in an early paper (1759) we see him solving linear difference equations with constant coefficients with the help of the so-called characteristic equation. Moreover, it is here that he introduces his ‚method of variation of parameters for solving a nonhomogeneous equation given solutions of the homogeneous one‘“ (Goldstine 1977: 145).
- 20 Ab den 1920er Jahren wurden Hollorith-Maschinen für die Wetterprognose verwendet. „In the late 1930s the weather service of every major European country was analyzing data by means of punched cards. [...] Tabulating equipment thus made it possible to use many more data than was possible before. Another important result was a higher standard of weather data“ (Nebeker 1995: 93).
- 21 Der Einfluss der beiden Weltkriege auf die Fortschritte der Wissenschaft, auch der Meteorologie ist enorm. 1946 sieht die Situation für Meteorolo-

seines programmierbaren IAS Computers arbeitete, hatte ein meteorologisches Problem für den Test seines Computers ausgewählt. Jule Charney, der zu diesem Treffen eingeladen worden war, arbeitete zu jener Zeit an einer Theorie quasi-geostrophischer Bewegung, welche im Kontext der numerischen Anwendung genau jene Probleme vermied, die Richardson zuvor zu seiner verhängnisvollen Fehlprognose geführt hatten (vgl. Charney 1948).²² Ab 1948 übernahm er die Leitung der meteorologischen Gruppe in von Neumanns Computerprojekt und entwickelte mit Kollegen ein erstes Computermodell für die Wettervorhersage (vgl. Charney, Eliassen 1949). In seinem Artikel *On a physical bias for numerical prediction of large-scale motions in the atmosphere* beschreibt Charney sein Programm einer numerischen Wettervorhersage: „First justifying the geostrophic system, then beginning with simple models and finally progressing to more complicated models. [...] NWP should proceed by gradually including those factors that experienced forecasters had found useful“ (Charney zitiert nach Phillips 2000: 16; vgl. Charney 1949).

Die Grundlage dieses ersten Computermodells bildete ein barotropes Modell, in welchem der Luftdruck eine Funktion der Dichte ist und in dem die Flächen gleichen Drucks (Isobaren) parallel zu den Flächen gleicher Temperatur verlaufen. In einem solchen, stark idealisierten Modell ist die Windgeschwindigkeit konstant. Aufbauend auf dieses idealisierte Modell entwickelten Charney und seine Kollegen Randbedingungen für die vertikale und horizontale Auflösung des Modells, um es für eine 500 mb Höhe auf dem Computer berechnen zu können.²³ Von Neumann beschrieb das Modell auf einem Vortrag 1954 in Deutschland:

gen komplett anders aus als 1904. Es standen wesentlich mehr Messdaten zur Verfügung, leistungsfähigere mechanische Rechenmaschinen, ausgefilterte Methoden der Prognose auf Basis synoptischer Karten und wesentlich mehr Spezialisten.

- 22 Die geostrophische Bewegung ist ein idealisiertes Wind-Modell, bei dem sich der Wind parallel zu den Isobaren bewegt und in welchem sich Druckgradient und Corioliskraft gegenseitig aufheben. „By the end of 1947, he had found a ‚filtering‘ method which would remove ‚noise‘ – energy waves that did not contribute to the solution, but which complicated the solution. Von Neumann was pleased when he found out that Charney was interested in the Meteorological Project“ (Harper 2004: 86).
- 23 500mb entsprechen nach der barometrischen Höhenformel in etwa der Höhe von 5.000 Metern und damit der Mitte der Troposphäre, in der sich nahezu alle wetterrelevanten Phänomene abspielen und die in 10 bis 12 km Höhe reicht.

„Das vereinfachte Modell der atmosphärischen Hydrodynamik, das wir benutzten, beruhte darauf, nur die Druckverteilung in der Atmosphäre anzugeben. Das liegt daran, daß die rein hydrodynamischen Luftkräfte dominiert sind [...] nämlich in erster Linie durch die Schwerkraft und in zweiter Linie durch die von der Drehgeschwindigkeit der Erde herrührende Corioliskraft (die letztere aber nur außerhalb der Äquatorialzone!). Hieraus folgen – durch gewisse legitime Vernachlässigungen – zwei wichtige vereinfachende Prinzipien, nämlich das ‚hydrostatische Prinzip‘ (der Schwerkraft entsprechend) und das ‚geostrophische Prinzip‘ (der Corioliskraft entsprechend). Mit ihrer Hilfe bestimmt die Druckverteilung die Temperaturverteilung (hydrostatisches Prinzip) und daher auch die Entropieverteilung sowie die Horizontalkomponenten der Geschwindigkeitsverteilung (geostrophisches Prinzip) und, wenn nötig, auch deren Vertikalkomponente (Erhaltung der invarianten Kombination von Entropie und Wirbelvektor – die ‚spezifische Wirbelstärke‘ von C.A.G. Rossby). Daher lassen sich in dieser (sehr günstigen!) Situation die üblichen Differentialgleichungen der Hydrodynamik derart umformen, daß in ihnen nur die Druckverteilung vorkommt. [...] Diese Umformung der hydrodynamischen Differentialgleichung [...] ist eine der schönen Leistungen J. Charney. In dieser Form können die Differentialgleichungen dann für irgendwelche ausgedehnte, in Bezug auf meteorologische Phänomene in allen Höhenlagen und jederzeit wohlbeobachtete Teile der Erdoberfläche angesetzt werden“ (von Neumann 1954: 262, 263).

Die erste Wettersimulation wurde 1950 auf ENIAC durchgeführt, da der IAS Computer noch nicht fertig gestellt war. Eine 24-Stunden Prognose der Luftdruckänderung für eine einzige Luftschicht benötigte auf ENIAC 24 Stunden Rechenzeit, während sie später auf dem IAS Computer nur noch 6 Minuten dauerte. Denn die „1-Lagen-Rechnung erforderte etwa 200 000 Multiplikationen“ (von Neumann 1954: 266).²⁴ Insgesamt berechneten Charney et al. 1950 vier 24-Stunden und zwei 12-Stunden-Vorhersagen. Die Ergebnisse dieser Berechnungen wurden auf über hunderttausend Lochkarten gespeichert. Optimistisch verkündete von Neumann in Folge der geglückten Berechnungen: „Wir wissen, daß das 1-Lagen-Modell in der Regel ungefähr so gut ist wie ein erfahrener ‚subjektiver‘ Wettersachverständiger [...] während das 3-Lagen-Modell wesentlich besser ist“ (von Neumann 1954: 266). Dieser Optimismus war jedoch zu Beginn der numerischen Wettervorhersage kaum gerechtfertigt. Es zeigten sich schnell die intrinsischen Probleme von Charneys barotropem Modell. Sobald man das Modell mit schnelleren Computern für eine Halbkugel berechnen konnte, traten Fehler in der Ausbreitung großräumiger Wellen auf. Die Kritik wurde laut, dass die Berechnung

24 1-Lagen-Rechnung meint die vertikale Auflösung in einer Schicht. Es handelt sich um ein einfaches, zweidimensionales Modell.

des Luftdrucks noch keine Wettervorhersage darstelle: „500 mb geopotential is not weather’. According to Charney, Norbert Wiener at MIT, who proposed to employ linear ‘black box’ prediction methods based on long time series of past data, stated: Von Neumann and Charney were misleading the public by pretending that the atmosphere was predictable as deterministic system“ (Arakawa 2000: 6). Zudem entsprachen die Vereinfachungen dieses ersten Modells weitgehend jenen Vereinfachungen, die Bjerknes in seiner Konzeption von 1904 ablehnte. Dennoch setzten sich die barotropen und baroklinen Modelle, und damit die deterministische Methode für die Wettervorhersage durch (vgl. Phillips 1951; Eliassen 1952; Charney, Phillips 1953; Bolin 1953). Die baroklinen Modelle wurden später durch so genannte primitive barokline Gleichungen abgelöst (vgl. Smagorinsky 1958; Hinkelmann 1959). „Diese frühen numerischen Vorhersagen (für eine trockene Atmosphäre in einer begrenzten Region) führten zur Entwicklung von Mehrschichtenmodellen, wie sie bis heute andauert“ (Gates 2003: 4).²⁵ Akio Arakawa bezeichnete den Zeitraum von 1950 bis 1960 als „epoch-making first phase. [...] Through this work, the relevance of such a simple dynamical model for daily change of weather was demonstrated for the first time in history, and thus dynamic meteorologists began to be directly involved in the practical problem of forecasting. In this way, dynamic meteorology and synoptic meteorology began to merge during this phase“ (Arakawa 2000: 6, 7).

Der Erfolg der baroklinen Modelle veranlasste Meteorologen wie Norman Phillips dazu, die Frage zu stellen, ob diese Modelle auch für die Prognose allgemeiner atmosphärischer Zirkulationseffekte genutzt werden konnten. Phillips, der ab 1952 mit Charney in von Neumanns meteorologischem Projekt arbeitete, programmierte ein Modell, mit dem er zeigen wollte, dass sich die grundlegenden Muster der globalen Zirkulation auf Basis mathematischer Gleichungen erzeugen lassen. Sein numerisches Experiment von 1956 gilt heute als Auftakt der Klimamodellierung, wenngleich es sich dabei um ein sehr einfaches 2-Schichten-Modell handelte. In dem Artikel *The general circulation of the atmosphere: a numerical experiment* beschrieb er sein Experiment, das die konzeptuellen Modelle der Zirkulation von Halley, Hadley, Dove, Ferrel

25 In Schweden hatten die Meteorologen Zugriff auf BESK, einen Computer, der Anfang der 1950er Jahren nach dem Vorbild von John von Neumanns IAS Computer gebaut worden war. Zwischen den Gruppen in Princeton und Stockholm bestand ein reger Austausch. Bereits Mitte 1952 nutzte Ernst Hovmöller vom Schwedischen Meteorologischen und Hydrologischen Institut barokline Modelle zur Wettervorhersage (vgl. Harper 2004).

und andere im Computer fortführte und verfeinerte (vgl. Phillips 1956). Dieses konzeptuelle Modell der drei Zirkulationsregime – Tropen (Hadley cell), gemäßigte Breiten (Ferrel cell) und polares Regime (s. Abbildung 7) – war zu Beginn des 20. Jahrhunderts zunehmend detailliert (vgl. Rossby 1927, 1938; Palmen 1949; Riehl et al. 1954) und mit den hydro- und thermodynamischen Gleichungen verknüpft worden (vgl. Bjerknes 1904). In seinem Experiment untersuchte Phillips die verschiedenen Muster der Zirkulation: „We see the appearance of a definite three-cell circulation, with an indirect cell in middle latitudes and two somewhat weaker cells to the north and south. This is a characteristic feature of the unstable baroclinic waves in the two-level model“ (Phillips 1956: 144, 145). Allerdings lösten sich die Strömungsmuster nach einem Monat aufgrund von Rundungsfehlern durch die Diskretisierung in Chaos auf.²⁶ Dennoch stellte in der anschließenden Diskussion des Experiments unter Meteorologen Eric Eady fest: „Numerical integration of the kind Dr. Phillips has carried out give us a unique opportunity to study large-scale meteorology as an experimental science. By using a simple model and initial conditions which never occur in the real atmosphere he has been able to isolate, and study separately, certain fundamental properties of atmospheric motion – the kind of procedure adopted by all good experimenters“ (Eady zitiert nach Lewis 2000: 117). Mit Phillips’ numerischem Experiment von 1956 eröffnete sich der Weg, auf Basis numerischer Computerexperimente klimatische Prozesse zu studieren, und die „magnificent second phase“ (Arakawa 2000: 21) der globalen Zirkulationsmodelle begann, welche die baroklinen Modelle ablösten.²⁷ Arakawa, ein führender Klimaforscher dieser zweiten Phase, berichtete über diese Zeit: „I myself was also extremely inspired by Phillips’ work. [...] Phillips’ work highlighted the fact, which people began to recognize around that time, that the dynamics of cyclones and that of general circulation are closely related“ (Arakawa zitiert nach Lewis 2000: 119). Dieser Zusammenhang zwischen der globalen Zirku-

26 „After 26 days, the field of V became very irregular owing to large truncation errors“ (Phillips 1956: 145). Die Problematik von Rundungsfehlern, die sich im Laufe der Iterationen von Zeitschritt zu Zeitschritt aufschaukeln können, war bereits John von Neumann bekannt (vgl. von Neumann 1946). Noch während Phillips’ Experiment organisierte von Neumann 1955 die Tagung *On the Application of Numerical Integration Techniques to the Problem of the General Circulation* (vgl. Pfeffer 1960; Küppers, Lenhard 2005).

27 „Between the late 1950s and the early 1960s, four separate groups began – more or less independently – to build many-leveled, three-dimensional GCMs based on the primitive equations of Bjerknes and Richardson“ (Edwards 2000: 71).

lation und dem Entstehen von Zyklonen, welche regionale Wetterphänomene verursachen, stellt das Scharnier zwischen Klimaforschung und Wettervorhersage dar. Es zeigt sich darin, dass sowohl Klima- wie auch Wettermodelle seit den 1960er Jahren auf globalen Zirkulationsmodellen basieren.

Mit der zunehmenden Leistungsfähigkeit der Computer wurden auch die Modelle komplexer und die numerischen Experimente umfangreicher. Vor allem die räumliche Auflösung der Modelle nahm zu. Während Charneys Berechnungen noch auf das Gebiet der USA begrenzt waren, wurden die folgenden Modelle anfangs für eine Hemisphäre und später für den gesamten Globus berechnet. Parallel dazu verfeinerte sich die horizontale Auflösung der Modelle wie auch die vertikale Auflösung in Schichten. Mussten sich Charney und von Neumann noch mit einer beziehungsweise mit drei Schichten begnügen, so wurden die Modelle der 1960er und 1970er Jahre für bis zu neun Schichten berechnet. Die höhere räumliche Auflösung erfordert wiederum eine feinere zeitliche Auflösung. Auf diese Weise schrauben sich die Auflösung und damit der Rechenaufwand der Modelle kontinuierlich nach oben. Heutige Atmosphärenmodelle werden global für eine horizontale Auflösung von 60 bis 110 Kilometern und einer vertikalen Auflösung von mehreren Duzend Schichten im 10-Minuten-Takt berechnet.

Die Entwicklungen der zweiten Phase vom Beginn der 1960er bis zum Ende der 1980er Jahre führte zu einer Fülle unterschiedlicher Modelle und Modellierungsstrategien. Neben einfachen Energiebilanzmodellen, welche die Ein- und Ausstrahlung der solaren Energie und damit einen möglichen Treibhauseffekt simulieren, entstanden die zunehmend komplexeren, globalen Zirkulationsmodelle der Atmosphäre. Zudem wurden Ozean-, Eis- und Landmodelle entwickelt. Bereits 1969 koppelten Syukuro Manabe und Frank O. Bryan ein Atmosphären- mit einem Ozeanmodell und gaben damit die zukünftige Entwicklung gekoppelter Modelle vor (vgl. Manabe, Bryan 1969). Während sich jedoch zu Beginn der zweiten Phase der Ehrgeiz auf die zunehmend realistischere Modellierung der Zirkulationsmuster konzentrierte, wurden die Modelle nach und nach für experimentelle Fragestellungen zu Klimaprozessen genutzt. Grundlegende Voraussetzung dafür war die Überwindung zahlreicher Modellierungsprobleme sowie die Einbeziehung von Prozessen, die nicht durch die großskalige Zirkulation berücksichtigt werden. Die Berücksichtigung dieser subskaligen Prozesse findet in Form von Parametrisierungen statt, beispielsweise „if the grid points in a horizontal plane are 100 km apart, then thunderstorms, which are typically several kilo-

meters across, cannot be directly represented. Their cumulative effect on, say, temperature or moisture content of the air in a region can, however, be estimated using statistical information about the likelihood, size, and intensity of thunderstorms in a larger region whose average properties are known“ (Nebeker 1995: 179).²⁸ Diese kumulativen Effekte müssen dann als global gemittelte Parametrisierungen dem Modell hinzugefügt werden. Typische Parametrisierungen umfassen die solaren und terrestrischen Strahlungsprozesse, die Phasenänderungen des Wassers in Form von Eis- und Wolkenbildung, die Konvektion sowie turbulente Austauschprozesse in der atmosphärischen Grenzschicht an der Erdoberfläche. Es sind die Parametrisierungen, welche die Modelle zunehmend in ihrem Codierungsumfang anwachsen und dadurch realitätsnaher werden lassen, welche aber erst dadurch die Experimente zum Klimawandel ermöglichen. Solche ersten Experimente zur Auswirkung der Verdoppelung der Kohlendioxidmenge in der Atmosphäre (vgl. Manabe, Wetherald 1975), zum klimatischen Einfluss der Waldrodungen in den Tropen (vgl. Charney 1975) oder zum Paläoklima (vgl. Gates 1976) gaben Einblicke in die komplexen Zusammenhänge des Klimas und Ausblicke auf mögliche Zukunftsszenarien.

Eine wichtige Entwicklung dieser zweiten Phase der computerbasierten Meteorologie war die Einführung neuer Modellierungsstrategien. Beispielsweise eliminierte Arakawa 1966 an der UCLA University of California in Los Angeles die Instabilitäten in Phillips' Experiment.²⁹ Indem er anstelle der Glättungsmethoden, mit welchen andere Modellierer die Instabilitäten auszugleichen versuchten, die Erhaltung der kinetischen Energie in sein Modell einführte, gelang es ihm, die Simulationsresultate zu stabilisieren.³⁰ In der General Circulation Research Section, welche

-
- 28 „With the introduction of the computer into meteorology came a new style of research in which numerical modeling was the dominant methodology. [...] A conspicuous effect of numerical modeling on research style was that parameterization became an important activity“ (Nebeker 1995: 177, 178).
- 29 Akio Arakawa, der 1961 von Yale Mintz an das Department of Meteorology der UCLA University of California in Los Angeles geholt wurde, gehörte zu den einflussreichsten Innovatoren der Klimamodellierung in den 1960er und 1970er Jahren.
- 30 „So ging er von der Erhaltung der kinetischen Energie in der Atmosphäre aus, obwohl klar war, dass diese Energie durch Reibung in Wärme umgesetzt wird, also definitiv nicht erhalten wird. [...] Physikalisch argumentiert kann man sagen, dass Arakawa mit der Erhaltung der kinetischen Energie künstlich das Anwachsen der Instabilitäten begrenzt hat. In der wirklichen Atmosphäre besorgt dies die Reibung“ (Küppers, Lenhard 2005: 322).

später als GFDL Geophysical Fluid Dynamics Laboratory an die Universität Princeton umsiedelte, entwickelten Syukuro Manabe und Joseph Smagorinsky ein Modell, das erstmals die konvektiven Prozesse berücksichtigte (vgl. Manabe et al. 1965). Konvektive Prozesse sorgen für die Erwärmung der Atmosphäre sowie deren Stabilisierung. Da diese Prozesse auf Skalen von Mikrometern bis Kilometern stattfinden, werden sie nicht durch die Modelldynamik aufgelöst und müssen parametrisiert werden. Da es jedoch kein empirisches Referenzmodell als Orientierungshilfe für eine adäquate Parametrisierung gibt, behilft man sich mit einer Anpassung der vertikalen Temperaturprofile während des Simulationslaufs. Dabei werden die Temperaturprofile für jeden Zeitschritt geprüft und gegebenenfalls durch Umverteilung stabilisiert. „Tritt in irgendeiner Modellschicht Übersättigung auf, so wird der überschüssige Wasserdampf als Niederschlag ausgeschieden. Das convective adjustment sorgt damit für einen Wärmeübergang von der Erdoberfläche in die Atmosphäre (wenn die unterste Modellschicht instabil wird), erwärmt die Atmosphäre durch Freisetzung latenter Wärme bei der Kondensation und stabilisiert die Atmosphäre durch vertikale Umverteilung der Energie“ (Roekner 2003: 9). Dieser Ansatz ist bis heute in Zirkulationsmodellen weit verbreitet. Eine Fülle weiterer Modellierungsstrategien von Prozessen folgte. In einem Vergleich der ersten drei Zirkulationsmodelle durch Charney 1978 bestach Arakawas Modell aufgrund seiner realistischen Ergebnisse. „Three general circulation models [Cecil E. Leiths Modell (LLNL Lawrence Livermore National Laboratories), Joseph Smagorinskys Modell (GFDL Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, Princeton) und Aiko Arakawas Modell (UCLA University of California, Los Angeles)] were used for parallel integrations of several weeks to determine the growth of small initial errors. Only Arakawa's model had the aperiodic behavior typical of the real atmosphere in extratropical latitudes, and his results were therefore used as a guide to predictability of the real atmosphere“ (Phillips 2000a: XXIX).

In dieser zweiten Phase formierten sich verschiedene Gruppen von Modellieren an unterschiedlichen Institutionen, welche einflussreiche Modellgenerationen entwickelten. Zwischen 1961 und 1963 hatten Yale Mintz und Akido Arakawa das erste UCLA Modell entwickelt, ein 2-Schichten Zirkulationsmodell, das eine realistische Land- und See-Eis-Verteilung berücksichtigte. Diesem Prototyp folgten vier Generationen von Zirkulationsmodellen, die unter anderem vom GISS Goddard Institute for Space Studies der NASA, der US Navy und anderen Institutionen verwendet wurden (vgl. Edwards 2000). Am GFDL Geophysical Fluid Dynamics Laboratory an der Universität Princeton entwickelten Joseph Smagorinsky, Gründer der General Circulation Research Sec-

tion/Laboratory des U.S. Weather Bureau, der die Arbeit von Charney und von Neumann fortführte, und Syukuro Manabe verschiedene und sehr einflussreiche Modellgenerationen.³¹ Der MARKFORT-Serie der 9-Schichten Zirkulationsmodells mit ‚convective adjustment‘ folgte die Zodiac-Serie, deren Modelle bis in die 1970er Jahre genutzt wurden. Die anschließenden Sector Modelle berücksichtigten bereits eine idealisierte Land-Ozean Verteilung, während die Skyhigh-Modelle eine hohe vertikale Auflösung aufwiesen. „In the mid-1970s, GFDL imported a copy of the spectral GCM code developed by W. Bourke at the Australian Numerical Meteorological Research Centre (Bourke, 1974; Gordon, 1976; Gordon and Stern, 1974). Interestingly, Bourke and Barrie Hunt had originally worked out the spectral modeling techniques while visiting GFDL in the early 1970s“ (Edwards 2000: 73).³² Weitere wichtige Orte der Modellentwicklung in den USA waren die LLNL Lawrence Livermore National Laboratories mit Cecil E. Leiths LAM Modell, das 1960 gegründete NCAR National Centre for Atmospheric Research mit den NCAR 1-3 Modellen von Akira Kasahara und Warren Washington sowie ab den späten 1970er Jahren den CCM 0-1 Community Climate Models.

Außerhalb der USA begann die Entwicklung globaler Zirkulationsmodelle in den 1960er Jahren am Australian Numerical Meteorological Research Centre, in den 1970er Jahren am britischen Meteorological Office, gefolgt von Modellentwicklungen am ECMWF European Centre for Medium Range Weather Forecast in Großbritannien, dem Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg und an anderen Orten.

- 31 Die 1955 gegründete General Circulation Research Section des U.S. Weather Bureau war in Suitland, Maryland ansässig, unweit der JNWP Joint Numerical Weather Prediction Unit. 1959 wurde die Sektion in General Circulation Research Laboratory umbenannt und nach Washington, D.C. umgesiedelt. 1963 erfolgte eine weitere Umbenennung in GFDL Geophysical Fluid Dynamics Laboratory und 1968 zog das GFDL an die Universität Princeton, wo es zu einem der einflussreichsten Departments der Klimamodellierung bis heute wurde.
- 32 Die Diskretisierung der Modelle durch die Differenzenmethode erfolgte in einem rechtwinkligen Koordinatensystem (Berechnungsgitter). Dies führte zu numerischen Instabilitäten. Die Nutzung von Spektralfunktionen zur Berechnung der globalen Zirkulationsprozesse im Spektralraum vermeidet diese Instabilitäten (vgl. Bourke 1974). „Ungefähr die Hälfte der modernen GCMs haben eine spektrale Formulierung, jedoch werden die physikalischen Parametrisierungen in jedem Fall auf Gittern mit finiten Differenzen berechnet“ (Gates 2003: 4). Dabei entspricht beispielsweise einer Auflösung von 110 Kilometern im rechtwinkligen Berechnungsgitter, wie sie im vierten Assessment Report des IPCC 2007 verwendet wurde, eine T106 Auflösung im Spektralraum. Die Zahl T106 gibt die Anzahl der Wellen im Spektralraum an.

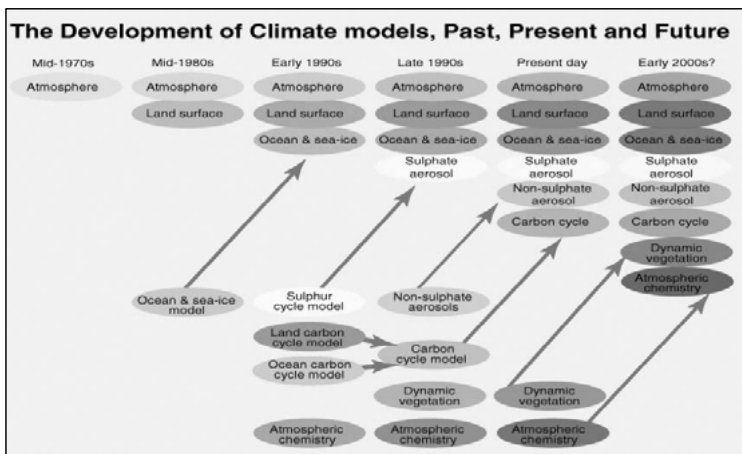
Einen aktuellen Überblick führender Klimamodelle bietet die Liste der am IPCC Assessment Report 2007 beteiligten Institutionen, wie in Abbildung 9 dargestellt.

Modelle	Institute
1: BCC-CM1, 2005	Beijing Climate Center, China
2: BCCR-BCM2.0, 2005	Bjerknes Centre for Climate Research, Norway
3: CCSM3, 2005	National Center for Atmospheric Research, USA
4: CGCM3.1(T47), 2005 5: CGCM3.1(T63), 2005	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Canada
6: CNRM-CM3, 2004	Météo-France/Centre National de Recherches Météorologiques, France
7: CSIRO-MK3.0, 2001	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) Atmospheric Research, Australia
8: ECHAM5/MPI-OM, 2005	Max Planck Institute for Meteorology, Germany
9: ECHO-G, 1999	Meteorological Institute of the University of Bonn, Meteorological Research Institute of the Korea Meteorological Administration (KMA), and Model and Data Group, Germany/Korea
10: FGOALS-g1.0, 2004	National Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG)/Institute of Atmospheric Physics, China
11: GFDL-CM2.0, 2005 12: GFDL-CM2.1, 2005	U.S. Department of Commerce/National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)/ Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL), USA
13: GISS-AOM, 2004 14: GISS-EH, 2004 15: GISS-ER, 2004	National Aeronautics and Space Administration (NASA)/Goddard Institute for Space Studies (GISS), USA
16: INM-CM3.0, 2004	Institute for Numerical Mathematics, Russia
17: IPSL-CM4, 2005	Institut Pierre Simon Laplace, France
18: MIROC3.2(hires), 2004 19: MIROC3.2(medres), 2004	Center for Climate System Research (University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Frontier Research Center for Global Change (JAMSTEC), Japan
20: MRI-CGCM2.3.2, 2003	Meteorological Research Institute, Japan
21: PCM, 1998	National Center for Atmospheric Research, USA
22: UKMO-HadCM3, 1997 23: UKMO-HadGEM1, 2004	Hadley Centre for Climate Prediction and Research/Met Office, UK

Abbildung 9: IPCC Modelle (vgl. IPCC AR4 WG1 2007: 597 - 599)

Erdsysteme

Nach der ersten ‚epoch-making‘ (bis 1950) und der zweiten ‚magnificent‘ Phase (1950 bis 1990) befindet sich die computerbasierte Meteorologie heute in ihrer dritten Phase der gekoppelten Modelle, die Arakawa die ‚great challenge phase‘ nannte (vgl. Arakawa 2000: 723ff). Dabei basiert der aktuelle Standard der Klimamodelle auf gekoppelten Atmosphären-Ozeanmodellen, welche durch Land-, Eis-, Vegetations- und verschiedene chemische Modelle ergänzt werden. Das Ziel ist es, ganze Erdsysteme zu modellieren und mit ihnen zu experimentieren. Dabei wird deutlich, dass sich das Klimasystem nicht nur auf die atmosphärischen Prozesse beschränken lässt, sondern dass die Atmosphäre eines von mehreren Subsystemen ist. Erdsysteme beschreiben die Wechselwirkungen dieser verschiedenen Subsysteme des Klimas wie der Atmosphäre, der Hydrosphäre (Ozeane, Seen, Flüsse), der Kryosphäre (Eis und Schnee), der Lithosphäre (Boden und Gesteinsschichten) und der Biosphäre (Pflanzen und Tiere) auf Zeitskalen von zehn bis Hunderten von Jahren. Die Frage nach dem vom Menschen verursachten Klimawandel bringt seit neuestem die Anthroposphäre (sozio-ökonomische Entwicklungen) als ein weiteres Subsystem des Klimas ins Spiel. Die Modellierung solcher umfangreichen Modelle stellt eine große Herausforderung für die Wissenschaft dar. Zum einen müssen verschiedene Wissenschaftsbereiche mit unterschiedlichen Wissensbeständen in ein Erdsystem integriert werden. Dabei können nicht alle Bereiche auf eine so lange Modellierungserfahrung verweisen wie die Meteorologie. Zum anderen sind Erdsysteme gigantische Modelle, an welchen Duzende von Wissenschaftlern gleichzeitig arbeiten. Den Überblick zu behalten, ist dabei nicht leicht. Ein einzelner Forscher kann allenfalls seinen Modellierungsbereich überblicken und muss sich ansonsten auf die Expertise seiner Kollegen verlassen. Darüber hinaus lassen sich die verschiedenen Subsysteme nicht so einfach koppeln. Was für die Kopplung von Atmosphären- und Ozeanmodellen noch zu bewerkstelligen war, da beide Modelle auf denselben strömungsdynamischen Gleichungen basieren, gestaltet sich für die Biosphäre oder die Anthroposphäre weitaus schwieriger. Hier lassen sich keine physikalischen Grundgleichungen angeben, da die Entwicklung dieser Sphären nicht auf mechanischen Prozessen basiert.



*Abbildung 10: Entwicklung der Klimamodelle
(IPCC TAR WG1 2001: 48)*

Die aktuellen Subsystem-Modelle des Erdsystems unterscheiden sich dabei stark von den ersten Modellen, wie in Abbildung 10 dargestellt. Auch wenn für die Atmosphärenmodelle immer noch dieselbe Dynamik, basierend auf Bjerknes konzeptuellem Modell der sieben meteorologischen Variablen von 1904, verwendet wird, haben heutige Zirkulationsmodelle mit Phillips numerischem Experiment von 1956 oder dem ersten gekoppelten Ozean-Atmosphärenmodell von Bryan und Manabe von 1967 kaum noch etwas gemeinsam. Der Fortschritt besteht in neuen Modellierungsstrategien, neuen Parametrisierungen und in verbesserten Auflösungen. Ähnliches gilt für Ozean-, Land-, Eis- und Vegetationsmodelle sowie die weiteren Modelle eines Erdsystems. Im aktuellen IPCC Bericht heißt es dazu:

„Replacing ‚slab‘ ocean models by fully coupled ocean-atmosphere models may arguably have constituted one of the most significant leaps forward in climate modelling during the last 20 years, although both the atmospheric and oceanic components themselves have undergone highly significant improvements. This advance has led to significant modifications in the patterns of simulated climate change, particularly in oceanic regions. It has also opened up the possibility of exploring transient climate scenarios, and it constitutes a step toward the development of comprehensive ‚Earth-system models‘ that include explicit representations of chemical and biogeochemical cycles“ (IPCC AR4 WG1 2007: 117).

Ein weiterer Unterschied der heutigen Forschung mit Erdsystemen zu bisherigen Atmosphärenmodellen besteht in ihrem sozio-politischen Anspruch. Je komplexer und umfangreicher das Modellsystem ist, desto mehr Antworten erhofft man sich auf die drängenden Fragen nach den Folgen des Klimawandels. Dabei verlässt die Wissenschaft ihren neutralen Platz und versucht, Aussagen über gesellschaftliche Entwicklungen zu geben. Dies hat Folgen, denn wissenschaftliche Forschung wird dabei zunehmend in problemorientierte Forschung transformiert. Diese Entwicklung lässt sich in der Klimaforschung seit den 1970er Jahren beobachten, aber die Entwicklung hin zur Forschung mit Erdsystemen dokumentiert dies besonders deutlich (vgl. Beckmann et al. 1995). Vor allem deshalb, weil „Earth scientists are unable to perform controlled experiments on the planet as a whole and then observe the results. In this sense, Earth science is similar to the disciplines of astronomy and cosmology that cannot conduct experiments on galaxies or the cosmos. This is an important consideration, because it is precisely such whole-Earth, system-scale experiments, incorporating the full complexity of interacting processes and feedbacks, that might ideally be required to fully verify or falsify climate change hypotheses“ (IPCC AR4 WG1 2007: 98). Erdsysteme nun stellen eine vielversprechende Alternative dar, um klimatische Interaktionen und Prozesse zu verstehen, aber auch um Antworten und Prognosen zu liefern. Dabei vereinigen sie immer mehr Wissenschaftsbereiche in sich. In diesem Sinne sind Erdsysteme im Begriff, sich zu den elaboriertesten Experimentalsystemen der Computational Sciences zu entwickeln.

