

Jobst Conrad

Ozonforschung und Klimaforschung im Vergleich

Wissenschaftliche Entwicklungsdynamik und disziplinäre Verankerungen

Schriftenreihe des IÖW 191/08



i | ö | w

INSTITUT FÜR
ÖKOLOGISCHE WIRTSCHAFTSFORSCHUNG

Jobst Conrad

Ozonforschung und Klimaforschung im Vergleich

Wissenschaftliche Entwicklungsdynamik und disziplinäre Verankerungen

Schriftenreihe des IÖW 191/08
Berlin, Dezember 2008

ISBN 978-3-932092-94-7

Impressum

Herausgeber:
Institut für ökologische
Wirtschaftsforschung (IÖW)
Potsdamer Straße 105
D-10785 Berlin
Tel. +49 – 30 – 884 594-0
Fax +49 – 30 – 882 54 39
E-mail: mailbox@ioew.de
www.ioew.de

Neugestaltete Ausgabe 2009

Information

Diese Studie ist in gekürzter Form enthalten im Endbericht des an der TU Dresden durchgeführten Forschungsvorhabens „Problemorientierte Forschung und wissenschaftliche Dynamik. Das Beispiel der Klimaforschung“ (Halfmann, Conrad, Schützenmeister, Poloni 2008), das vom BMBF als Teil des Förderschwerpunkts „Wissen für Entscheidungsprozesse – Forschung zum Verhältnis von Wissenschaft, Politik und Gesellschaft“ gefördert wurde.

Zusammenfassung

Ozonforschung und Klimaforschung stellen zwei prototypische Beispiele einer wissenschaftlichen Entwicklungsdynamik dar, die erzeugt wird durch das Zusammenwirken von wissenschaftlicher Beobachtung und Entdeckung, von gesellschaftlicher Problemwahrnehmung und Risikodefinition, und von institutionalisiertem Austausch und Interessenabgleich in Form von massiver Forschungsförderung, supranational organisierten Forschungsprogrammen und -projekten, aufwändigen Assessments und inner- und außerwissenschaftliche Legitimität besitzenden Grenzorganisationen. Die Studie beschreibt, wie dies in einem vielfach ungleichzeitigen, teils fragmentierten und widerspruchsvollen, mit der Zeit teils bewusst koordinierten und organisierten, eher langwierigen historischen Prozess geschieht. Wenngleich soziale Einbettung und Strukturmerkmale beachtliche Parallelen aufweisen, und die Organisationsformen von Ozonforschung und Ozonregime partiell als Vorbild und Impuls für analoge Anstrengungen in Klimaforschung und Klimaregime fungierten, sind beide sowohl in Umfang, Untersuchungsgegenstand und Art der wissenschaftlichen Problemstellung als auch in der sozialen Reichweite der erforderlichen Maßnahmen zur Lösung der gesellschaftlichen Probleme stratosphärischen Ozonabbaus einerseits, und Begrenzung des Klimawandels andererseits, deutlich zu unterscheiden. Zusammenfassend lassen sich sowohl die Ozonforschung als auch die Klimaforschung als exemplarische (erfolgreiche) Belege dafür lesen und interpretieren, dass

- problemorientierte multidisziplinäre Forschung in modernen Gesellschaften der zunehmend vorherrschende Modus wissenschaftlicher Forschung wird,
- ihre damit einhergehende Finalisierbarkeit durchaus von der theoretischen und (mess)technischen Reife der genutzten Fächer und (Sub-)Disziplinen abhängt,
- hierfür organisationale Kopplungen aufgebaut werden und notwendig sind, um Abstimmungs-, Aushandlungs- und Transferprozesse zwischen Wissenschaft und Politik (oder Wirtschaft) zur wechselseitigen Übersetzung und Lösung wissenschaftlicher, technischer und/oder praktischer Probleme für beide Seiten dauerhaft wirksam und erfolgreich zu gestalten
- und dabei die funktionspezifischen Grenzen zwischen dem Wissenschaftssystem und anderen Funktionssystemen aufrechterhalten werden, sodass es zu keiner willkürlichen Mischung unterschiedlicher Rationalitäten oder gar zur Aufhebung seiner funktionalen Differenzierung kommt.

Abstract

Ozone research and climate research are two prototype examples of a scientific development dynamics which is generated by the interaction of scientific observation and discovery, of societal problem perception and risk definition, and of institutionalized exchange and reconciliation of interests in terms of massive research promotion and grants, supra-nationally organized research programs and projects, extensive assessments and boundary organizations disposing of internal and external scientific legitimacy. The study describes how this development dynamics occurs in a frequently asynchronous, partly fragmented and contradictory, protracted historical process which partly has been coordinated and organized consciously over time. Although the social embedding and structural features of ozone research and climate research show considerable parallels and the organizational forms of ozone research and of the ozone regime partly served as model and impulse for analogous efforts in climate research and the climate regime, both research areas have to be clearly distinguished concerning their size, research objects and kind of scientific problems,

on the one hand, and concerning the societal scope of necessary measures to solve the social problems of stratospheric ozone depletion and of limiting climate change, on the other hand. In sum, ozone research as well as climate research can be read and interpreted as exemplary (successful) evidence

- that problem oriented multidisciplinary research increasingly becomes the dominant mode of scientific research in modern societies,
- that their corresponding finalizability in fact depends on the theoretical and technical/metrological maturity of the subjects and (sub-)disciplines used,
- that organizational couplings are installed and necessary for this purpose in order to arrange coordination, bargaining and transfer processes between science and politics (or the economy) to mutually translate and solve scientific, technical and/or practical problems for both sides in a long-term effective and successful manner,
- and that the function-specific borders between the science system and other socio-functional systems are maintained in this process so that no arbitrary mixture of different rationalities or even a abolition of its functional differentiation may occur.

Der Autor

Dr. Jobst Conrad ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Forschungsfeld Umweltökonomie und Umweltpolitik am Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW). Seine Forschungsschwerpunkte sind Umwelt-, Technologie-, Klima-, Energiepolitik, Wissenschaftsdynamik, Innovationssysteme und nachhaltige Entwicklung.

Kontakt: Jobst.Conrad@ioew.de

Tel. +49 – 30 – 884 594-0

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung und Kontext.....	11
2	Analytische Denotationen und Hypothesen	12
3	Ozonforschung	18
4	Klimaforschung.....	34
5	Problemorientierung, organisationale Kopplung und die Rolle wissenschaftlicher Kontroversen.....	62
6	Wissenschaftssoziologische Schlussfolgerungen.....	71
7	Literaturverzeichnis.....	78

Abbildungsverzeichnis

Abb. 7.1: Wissenschaftsdynamik: innerwissenschaftliche soziale und psychologische Determinanten	60
---	----

Tabellenverzeichnis

Tab. 6.1: Kennzeichen maßgeblicher wissenschaftlicher Kontroversen in den verschiedenen Phasen der Ozonforschung	33
--	----

Abkürzungsverzeichnis

AGGG	Advisory Group on Greenhouse Gases
AMO	Atlantic Multi-decadal Oscillation
AOGCM	atmosphere-ocean general circulation model (gekoppeltes Atmosphären-Ozean-Modell)
AR4	IPCC Fourth Assessment Report
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CIAP	Climate Impact Assessment Program
CCOL	Coordinating Committee on the Ozone Layer
CFC	chlorofluorocarbon
CIAP	Climate Impact Assessment Program
EAP	Environmental Assessment Panel
ENES	European Network for Earth System Modelling
ENSO	El Nino Southern Oscillation
EPA	Environmental Protection Agency
ESMF	Earth System Modelling Framework
ESSP	Earth System Science Partnership
EU	European Union (Europäische Union)
FAR	IPCC First Assessment Report
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoff
GARP	Global Atmospheric Research Program
GAW	Global Atmospheric Watch
GCM	Global Circulation Model
GCOS	Global Climate Observing System
GWP	global warming potential
ICSU	International Council of Scientific Unions, heute: International Council for Science
IGBP	International Geosphere-Biosphere Programme
IGOS	Integrated Global Observing Strategy
IGY	International Geophysical Year
IHDP	International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change
IMO	International Meteorological Organization
IOC	International Ozone Commission
IPCC	International Panel on Climate Change
NAS	National Academy of Sciences
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NOZE	National Ozone Expedition
NRC	National Research Council
NSDC	Network for Detection of Stratospheric Change
ODP	ozone depletion potential
OTP	Ozone Trends Panel
PCMDI	Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison
PIK	Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung
PRISM	Program for Integrated Earth System Modelling
SAP	Scientific Assessment Panel
SAR	IPCC Second Assessment Report
SMIC	Study of Man's Impact on Climate

TAR	IPCC Third Assessment Report
TEAP	Technology and Economic Assessment Panel
UARS	upper atmosphere research satellite
UNCED	United Nations Conference on Environment and Development
UNEP	United Nations Environment Programme
USA	United States of America
UV	ultraviolet
WCRP	World Climate Research Programme
WG	Working Group
WMO	World Meteorological Organization
WWR	World Weather Records
WWW	World Weather Watch

1 Einführung und Kontext

Ozonforschung und Klimaforschung stellen zwei prototypische Beispiele einer wissenschaftlichen Entwicklungsdynamik dar, die durch das Zusammenwirken von wissenschaftlicher Beobachtung und Entdeckung, von gesellschaftlicher Problemwahrnehmung und Risikodefinition, und von institutionalisiertem Austausch und Interessenabgleich in Form von massiver Forschungsförderung, supranational organisierten Forschungsprogrammen und -projekten, aufwändigen Assessments und inner- und außerwissenschaftliche Legitimität besitzenden Grenzorganisationen¹ in einem vielfach ungleichzeitigen, teils fragmentierten und widerspruchsvollen, mit der Zeit teils bewusst koordinierten und organisierten, eher langwierigen historischen Prozess erzeugt wird. Diese wissenschaftliche Entwicklungsdynamik führt zur gezielten und systematischen wissenschaftlichen Erforschung, Spezifizierung und Erklärung des als gesellschaftliches Problem perzipierten Objektbereichs und Wirkungszusammenhangs, zur Simulation seiner voraussichtlichen Entwicklungspfade und zur Ausbildung eines problemorientierten wissenschaftlichen Spezialgebiets oder sogar eines eigenen wissenschaftlichen Fachs und kann damit im Wissenschaftssystem institutionalisiert, normalisiert und routinisiert, aber auch beschränkt und zurückgeführt werden, wenn aus Sicht der die notwendigen Ressourcen bereitstellenden Institutionen ausreichende wissenschaftliche Erkenntnisse erlangt und geeignete Problemlösungen aufgezeigt wurden. Demnach bestünde „erfolgreiche Forschungspolitik vor allem in der Herstellung von strukturellen Kopplungen zwischen wissenschaftlicher Forschung und der Umwelt des Wissenschaftssystems durch ‚Grenzorganisationen‘, die einerseits die Variationsmöglichkeiten von interdisziplinärer Forschung erhöhen, andererseits die für die Bereitstellung wissenschaftlicher Forschungsleistungen nötigen Schließungsprozesse wissenschaftlicher Forschung stimulieren... [Dabei komme] der disziplinären Struktur der Wissenschaft bei der Übersetzung von außerwissenschaftlich formulierten Problemen eine zentrale Orientierungsfunktion zu, da sie anschlussfähige Wissensbestände bereithalte, die eine Übersetzung gesellschaftlicher Probleme in Forschungsprobleme erst erlauben.“ (Halfmann et al. 2003:2.9) Diese Studie verdeutlicht die durch diese Struktur- und Prozessmuster induzierte wissenschaftliche Entwicklungsdynamik und die sie kognitiv tragenden disziplinären Verankerungen an zwei Fallbeispielen, dem jeweils unbeabsichtigt anthropogen verursachten Ozonproblem und Klimaproblem, und der deshalb verstärkten, darauf bezogenen Ozonforschung und Klimaforschung. Grundlage dieser resümierenden skizzenhaften Darstellung sind die im Rahmen des (vom BMBF als Teil des Förderschwerpunkts „Wissen für Entscheidungsprozesse – Forschung zum Verhältnis von Wissenschaft, Politik und Gesellschaft“ geförderten) Forschungsvorhabens „Problemorientierte Forschung und wissenschaftliche Dynamik. Das Beispiel der Klimaforschung“ erstellten ausführlichen Studien über die Entwicklung dieser Forschungsgebiete (Conrad 2007, 2008a, 2008b) und die dort angegebene Literatur.²

Wenngleich soziale Einbettung und Strukturmerkmale beachtliche Parallelen aufweisen, und die Organisationsformen von Ozonforschung und Ozonregime partiell als Vorbild und Impuls für ana-

1 Der Begriff der Grenzorganisation wird hier rein deskriptiv zur Kennzeichnung solcher Organisationen verwandt, deren Aufbau und Funktionsreferenzen sich explizit oder klar erkennbar auf zwei Funktionssysteme und damit auf Transfer- und Austauschprozesse zwischen diesen beziehen, ohne damit theoretisch problematische, weiterreichende konzeptionelle Ansprüche wie z.B. Guston (2000, 2001) zu vertreten (vgl. Hiller 2009).

2 Festgehalten sei, dass diese Studien – auf der Basis von Experteninterviews und Literaturobwohl – im Kern in den jeweiligen (scientific) communities (inzwischen) durchaus bekannte bzw. entsprechend konstruierte Tatbestände zusammenfassen und epistemologisch bzw. wissenschaftssoziologisch rekonstruieren, und sie von daher keine genuin neuen empirischen Erkenntnisse präsentieren.

loge Anstrengungen in Klimaforschung und Klimaregime fungierten, sind beide sowohl in Umfang, Untersuchungsgegenstand und Art der wissenschaftlichen Problemstellung als auch in der sozialen Reichweite der erforderlichen Maßnahmen zur Lösung der gesellschaftlichen Probleme stratosphärischen Ozonabbaus einerseits, und Begrenzung des Klimawandels andererseits, deutlich zu unterscheiden.³ Die atmosphärische Ozonforschung gehört zu den Atmosphärenwissenschaften, die sich allgemein mit der Physik und Chemie der Atmosphäre befassen. Die Ozonforschung ist dabei kein genuiner Bestandteil der Klimaforschung, auch wenn es zu ihr vielfältige thematische Bezüge gibt: Ozon ist selbst ein Treibhausgas, die Ozon zerstörenden Fluor(chlor)kohlenwasserstoffe (FCKWs) und auch ihre Substitute sind teils starke Treibhausgase, Klimaänderungen, wie z.B. Änderungen stratosphärischer Temperaturen und Windzirkulation, beeinflussen den troposphärischen und stratosphärischen Ozongehalt (vgl. IPCC/TEAP 2005, WMO 2007).

In Kapitel 2 werden zunächst wesentliche genutzte wissenschaftssoziologische Begriffe, analytische Kategorien und Annahmen erläutert. Auf dieser Grundlage umreißen Kapitel 3 und 4 dann Ozonforschung und Klimaforschung in ihrer sich über mehr als ein Jahrhundert erstreckenden historischen Entwicklung, in ihren disziplinären Verankerungen und in den sie prägenden Entwicklungsdynamiken und wissenschaftlichen Kontroversen. Kapitel 5 legt anschließend typische (gemeinsame) Charakteristika dieser beiden Forschungsfelder dar: die mit der Verknüpfung von Problemorientierung und disziplinären Erklärungsmodellen entstehende Finalisierungstendenz, die sich in ähnlicher Form aus ihren sozialen Strukturmerkmalen ergebenden organisationalen Kopplungen, und – u.a. im Hinblick auf ihre Entwicklungsdynamiken – die Rolle wissenschaftlicher Kontroversen. Abschließend werden in Kapitel 6 zusammenfassende wissenschaftssoziologische Schlussfolgerungen präsentiert.

2 Analytische Denotationen und Hypothesen

Was die der Interpretation von Ozonforschung und Klimaforschung als prototypische Beispiele erfolgreicher problemorientierter (multidisziplinärer) Forschung zugrunde liegenden (wissenschaftssoziologischen) Analysekatoren, Annahmen und Theoreme anbelangt, so werden diese nachfolgend kurz vorgestellt, jedoch in ihrer Angemessenheit und ihren Theoriebezügen nicht näher begründet.⁴

Allgemein wird davon ausgegangen, dass die Beschreibung moderner Gesellschaft(en) als funktional differenzierte deren Grundzüge wiedergibt und dass das Wissenschaftssystem als primäres gesellschaftliches Subsystem Wissen entlang dem Code wahr/unwahr (im Sinne generalisierter Wahrheiten) zu entwickeln sucht, das sich (über Grundlagenforschung) reflexiv auf sich selbst bezieht und über diese Anschlussfähigkeit seine Identität erhält, das intern nach Disziplinen und Themen differenziert ist, in dem Menschen professionell als Wissenschaftler arbeiten, und das für andere soziale Teilsysteme Leistungen erbringt, falls seine spezifischen Outputs erfolgreich zu deren Inputs gemacht und dann weiter verarbeitet werden.⁵ Dabei ist mit der Unterscheidung der

3 Beide Problemlagen sind in ihrer gesellschaftlichen Relevanz nicht einfach vergleichbar, weshalb sich die einfache Übertragung von Erfahrungen mit dem Ozonregime auf die Gestaltung(smöglichkeiten) eines Klimaregimes verbietet. „Climate change bears a close relationship with the energy and land-use sectors which in turn are much more central to economic development than CFC use. Consequently, by its very nature climate change is much more political than ozone.“ (Agrawala 1997:25)

4 Diesbezüglich sei auf das Kapitel 3 in Conrad (2008a) verwiesen.

5 zur empirischen Begrenztheit dieser differenzierungstheoretischen Perspektive vgl. Knorr Cetina 1992.

(Analyse-)Ebenen von Gesellschaft, sozialen Funktionssystemen, Organisation und Individuum/individuelle Interaktion zu beachten, dass diese je verschiedenen Logiken folgen. Insbesondere verfügen Organisationen auch im Falle relativ klarer Zugehörigkeit zu einem bestimmten Funktionssystem über mehrfache funktionale Referenzen und können von daher zur Kopplung verschiedener Funktionssysteme entscheidend beitragen, ohne deshalb notwendig stets als genuine Grenzorganisationen zu fungieren (vgl. Hiller 2009).⁶

Was dabei die Optionen staatlicher Forschungssteuerung anbelangt, lässt sich mit Schimank (2006:221) festhalten: „Unter den forschungspolitischen Praktikern herrscht zwar Einigkeit darüber, dass sie sich in Wahrheitsfragen tunlichst nicht einmischen, sondern diese ausschließlich der wissenschaftlichen Selbstregulation überlassen. Auf drei Charakteristika des wissenschaftlichen Wissenskorporus will forschungspolitische Steuerung jedoch Einfluss nehmen: erstens auf die Forschungsthemen; zweitens auf die Innovationskraft, also das quantitative Wachstum und den qualitativen Fortschritt wissenschaftlicher Wahrheitssuche; und drittens auf den Typus der Forschung, der sich in kognitiver Hinsicht zwischen anwendungsferner Grundlagenforschung und technischer Entwicklung sowie in sozialer Hinsicht durch die entsprechenden Adressatenbezüge – neben der scientific community als innerwissenschaftlichem Adressat verschiedene Arten von außerwissenschaftlichen Adressaten – verortet.“

In der wissenschaftssoziologischen Literatur (vgl. Gläser 2006, Nowotny et al. 2001, Weingart 2001) wird aufgrund entsprechender Analysen und Fallstudien davon ausgegangen, dass problemorientierte (multidisziplinäre) Forschung in modernen Gesellschaften der zunehmend vorherrschende Modus wissenschaftlicher Forschung wird.⁷

Dies verändert zwar die Institution und Formen der Wissenschaft⁸, stellt aber den Primat des Wahrheitscodes im Wissenschaftssystem nicht in Frage und führt nicht zur willkürlichen Mischung unterschiedlicher Rationalitäten oder gar zur Aufhebung seiner funktionalen Differenzierung.⁹

Deshalb sind weitreichende Postulate dergestalt, dass u.a. ökologische Problemlagen wegen der damit verbundenen Unsicherheit wissenschaftlichen Wissens und des politischen Entscheidungsdrucks prinzipiell neue Formen der Wissensproduktion (post-normal science, Mode-2; vgl. Funt-

6 Und den letztlich allein realiter handelnden Individuen steht trotz vielfältiger soziostruktureller Formierungen und Restriktionen meist immer noch eine Vielzahl unterschiedlicher Handlungsoptionen offen.

7 „Wissensproduktion ist nicht länger vorrangig auf die Suche nach Naturgesetzen gerichtet, sondern findet in Anwendungskontexten statt. Disziplinen sind infolgedessen nicht mehr die entscheidenden Orientierungsrahmen, weder für die Forschung noch für die Definition von Gegenstandsbereichen.“ (Weingart 2001:15)

8 „Das Wachstum der Wissenschaft muss ... in mehrere strukturverändernde Prozesse differenziert werden, wenn man ein angemessenes Verständnis der Auswirkungen des Wachstums auf die Veränderungen der Identität der Wissenschaft als Institution gewinnen will. Die fortschreitende *Spezialisierung* und die damit einhergehende Differenzierung der Gegenstandsbereiche, Methoden, Spezialsprachen und Forschungskulturen führt zu einem *Verlust der inneren Einheit* der Wissenschaft... Die durch die Spezialisierung vorangetriebene *Expansion* der Wissenschaft hat eine *Verschiebung der institutionellen Grenzen* zur Folge. Die Demarkationslinie der Wissenschaft wird weiter >nach außen< verlagert in Bereiche, die vordem als außerhalb der wissenschaftlichen Beobachtung und Reflexion liegend galten... Wachstum und Identitätsveränderung gehen Hand in Hand. Das Wachstum der Wissenschaft ist die Kraft, die für die grundlegenden emergenten Veränderungen der Wissenschaft in der Gesellschaft verantwortlich ist.“ (Weingart 2001:124ff)

9 „As an agent of change, science becomes deeply immersed in the dynamics of society. This will change science. However, it will not dissolve the boundaries that differentiate science from politics or the economy. Once science becomes embedded in the process of innovation, it becomes intimately linked to the non-scientific institutions of political choice, of economic calculus, of legal and moral assessment. However, this does not render science a mixture of all rationalities. Quite the contrary: the more science is submitted to economic and political criteria, the more likely it is that scientists will be confined to the functional role associated with research competence (Krohn/Daele 1998:196ff).“ (Conrad 2002:56f)

wicz/Ravetz 1993a, 1993b, Gibbons et al. 1994, Nowotny et al. 2001) haben entstehen lassen, kaum haltbar.¹⁰

Hingegen erscheint die Finalisierungsthese in modifizierter Form diesen Wandlungsprozessen der Wissenschaft durchaus gemäß, insofern sich Finalität nicht auf die Form der Gesetzmäßigkeit, sondern auf die Möglichkeit der wissenschaftlichen Konzeptualisierung sozialer Ziele bezieht, und insofern finalisierte Fachgebiete oder Disziplinen im Spannungsfeld zwischen einem interdisziplinären Eklektizismus, der nur aus Gründen der sozialen Dringlichkeit betrieben wird, und einem allein durch theoretische Fragestellungen erzeugten wissenschaftlichen Interesse (an Anwendungsgrundlagentheorien) entstehen (vgl. Böhme et al. 1972, 1973, 1978, Krohn/Schäfer 1978). Auch wenn die Wissenschaft durch (externe) Problemlösungsanforderungen stets irritierbar ist, so variieren ihre (fachspezifische) Resistenz und Rezeptivität in Abhängigkeit von ihrem kognitiven, ihre Leistungsfähigkeit bestimmenden Entwicklungsstand¹¹ und von der Reichweite der (politischen) Steuerungsansprüche: Beschreibung/Assessment – Systemkontrolle – Konstruktion – Systembildung (vgl. Daele/Weingart 1975).

Wenn Forschung in einem bestimmten Gebiet aufgrund ihres kognitiven Reifegrades und damit einhergehender geringerer theoretischer, technischer und normativer Resistenzen (vgl. Daele/Krohn 1975) finalisierbar geworden ist, ist sie für externe Problem- und Zwecksetzungen nutzbar.

Andernfalls ist das Risiko zwar nachgefragter, jedoch unzureichender Forschungsbeiträge zur wissenschaftlich gestützten Lösung von (politischen) Problemen hoch, ganz unabhängig davon, dass die soziale und politische Perzeption von Problemen und erst recht ihre Übersetzung in Probleme, die durch wissenschaftliche Strategien zu lösen sind, stets durch Wissenschaft selbst vorgeprägt sind. (Daele/Weingart 1975:154)

Problemorientierte Forschung ist – anders als Grundlagenforschung – weniger an neuem generalisierbaren wissenschaftlichen Wissen interessiert als an der Nutzung allgemeinen Wissens für praktische (soziale) Probleme, die nicht entlang disziplinärer Kategorien und Abgrenzungen strukturiert sind. Grundsätzlich ist sie daher stets finalisierbar. Diese Ausrichtung impliziert zwangsläufig inhärente Unsicherheiten und die Notwendigkeit, disziplinäres Wissen problemorientiert zu verknüpfen. Das Zentralproblem problemorientierter Wissenschaft besteht somit darin, die angemessene Balance zwischen genügender Theorieorientierung und ausreichendem Problembezug zu finden.

In diesem Zusammenhang ist die analytische Unterscheidung von wissenschaftlichen, technischen und praktischen Problemen fruchtbar (vgl. Conrad 1980, Ravetz 1973).

Wissenschaftliche Problemlösung hat, grob gesprochen, die Feststellung neuer Eigenschaften von Untersuchungsgegenständen und letztlich das Zustandebringen von Erkenntnis, die Konstruktion von Fakten (im von Ravetz (1973) definierten Sinne), das Auffinden von generalisierten Wahrhei-

10 „Um die Beschreibung von >Modus 2< auf eine neue Produktionsweise wissenschaftlichen Wissens zuzuspitzen, die über traditionelle Merkmale wie organisatorische Heterogenität, Wissensproduktion in Anwendungskontexten und Interdisziplinarität hinausgeht, muss eine extreme Annahme gemacht werden: Nur die Annahme, dass lokale Kriterien der Relevanz und Qualität die Wissensproduktion dominieren, würde Modus 2 qualitativ von dem absetzen, was die Autoren den >alten< Modus der Wissensproduktion (Modus 1) genannt, aber nur als Karikatur beschrieben haben. Die Dominanz lokaler Kriterien würde aber keine Wissensproduktion durch internationale wissenschaftliche Gemeinschaften mehr erlauben. Wenn ein solcher Modus 2 über uns kommen sollte, handelt es sich jedenfalls nicht um eine Produktion wissenschaftlichen Wissens.“ (Gläser 2006:43f)

11 Dieser lässt sich etwa kennzeichnen durch die Sequenz: Existenz strukturierender Grundbegriffe, Operationalisierung, Analyse und Messverfahren – funktionale Erklärung, Makrotheorie des Gegenstandsbereichs – kausale Erklärung, Mikrotheorie des Gegenstandsbereichs – integrierte Wissenschaft, Theorie höherer Systeme.

ten zum Ziel. Dieser Zweck lenkt die wissenschaftliche Arbeit allerdings nur längerfristig, indirekt und allgemein.

Bei technischen Problemen stellt die zu erfüllende Funktion das Wesen des Problems dar und legt damit recht genau mögliche Beiträge der Problemlösung fest. Es geht weniger um generalisierte Wahrheit, sondern um erfolgreiches Funktionieren.¹² Der zu erfüllende Zweck, z.B. der Verkauf kommerzieller Produkte, beeinflusst die Arbeit an technischen Problemen nur sehr allgemein.

Praktische Probleme gruppieren sich um soziale (humane) Zwecke und dementsprechend intellektuell konstruierte Objekte wie Armut, Gesundheit, Rassendiskriminierung oder eben Klimawandel(folgen). Praktische Problemsituationen werden nicht primär erdacht oder erfunden, sondern entwickeln sich und präsentieren sich durch historische Prozesse. Formulierung, Untersuchung und Lösung eines praktischen Problems erfolgt naturgemäß im Rahmen der Weltsicht und des Diskurses, in deren Begriffsgebäude das Problem erkannt und ursprünglich beurteilt wurde.¹³

Ist aufgrund gesellschaftlich wahrgenommenen Problemdrucks und entsprechender Interessenkopplungen hinreichende Ressourcenzufuhr gewährleistet, hängen Erfolg und Wirksamkeit solcher problemorientierter (finalisierter) Forschung insbesondere von gelingenden Transfer- und Austauschprozessen zwischen Wissenschaft und anderen Funktionssystemen wie Politik oder Wirtschaft, die bei wechselseitigem Interesse typischerweise etwa in Form von Grenzorganisationen und Assessments sozialorganisatorisch verankert und auf Dauer gestellt werden.

Ob solche mehr oder minder institutionalisierten Formen von Transfer- und Austauschprozessen als konstitutive Elemente von Intersystemkommunikation, von operativen Kopplungen oder von strukturellen Kopplungen¹⁴ begriffen werden, soll angesichts der relativen Vagheit dieser Konzepte hier offen bleiben (vgl. Hiller 2009, Lieckweg 2001, Luhmann 1990, Willke 1989);¹⁵ stattdessen wird hierfür der eher deskriptiv ausgerichtete Begriff der organisationalen Kopplung verwandt.¹⁶

Dabei ist es wesentlich, Entstehungs-, Geltungs- und Verwendungszusammenhang in Forschung und Wissenschaft gegeneinander abzugrenzen. In der Forschung als Entstehungszusammenhang

12 Technik meint somit in erster Linie die relativ kontextfreie Übertragbarkeit bestimmter Funktions- und Wirkungszusammenhänge, die Möglichkeit praktischer Anwendung (wissenschaftlichen) Wissens ohne Verständnis des theoretischen Erzeugungskontextes.

13 Ein praktisches Problem ist im Allgemeinen aufgrund seiner Größe und Kompliziertheit zumeist nur mit wissenschaftlicher Hilfe lösbar, wozu es erst in technische und wissenschaftliche Problemstellungen übersetzt werden muss (vgl. Daele et al. 1979), es ist jedoch nicht als wissenschaftliches oder technisches lösbar.

14 „Strukturelle Kopplung sorgt so für das erforderliche Minimum an gesellschaftlicher Systemintegration. Ein simples Beispiel dafür ist etwa die Sensibilität des Forschungssystems für forschungspolitische Förderprogramme. Zumindest dann, wenn die Forschung in einem bestimmten Gebiet aufgrund ihres kognitiven Reifegrades ‚finalisierbar‘ geworden ist, wird die Richtung des weiteren Wissensfortschritts u.a. auch davon abhängen, welche Themenschwerpunkte ein solches Förderprogramm setzt, dessen Ressourcen gleichsam magnetisch Forschungshandeln anziehen. Die Evolution der modernen Gesellschaft als ganzer vollzieht sich dann als *Koevolution* strukturell gekoppelter Teilsysteme – etwa als ... Koevolution von Forschungs- und Wirtschaftssystem in Gestalt der wissenschaftlichen Entwicklung wirtschaftlich profitabler Technologien.“ (Schimank 2005:149)

15 Operative Kopplungen, die etwa zwischen Wissenschaft und Politik dauernd vorkommen, sind von strukturellen Kopplungen, die auf ein zwangsläufiges, strukturimmanentes Bedingungsverhältnis der Gleichzeitigkeit zwischen System und Umwelt bzw. koexistierenden Systemen wie Bewusstsein und neuro-physiologisches System oder Bewusstsein und Kommunikation abheben (Luhmann 1990:39f), zu unterscheiden. Ebenso sollte von struktureller Kopplung allenfalls dann gesprochen werden, wenn sie sich von Intersystemkommunikation in Form von Leistungsaustauschen unterscheidet (Lieckweg 2001:281).

16 Organisationale Kopplung hebt ab auf organisatorisch verankerte und damit nicht nur kurzfristig, sondern mittelfristig angelegte, dabei fallspezifisch geprägte und wieder aufhebbare operative Kopplungen, die durchaus Ausdruck von Intersystemkommunikation sein können.

geht es um die Generierung und Prüfung wissenschaftlich interessanter Hypothesen, ohne dass diese bereits als wahr anerkannt zu sein brauchen.

Für die Verwendung wissenschaftlichen Wissens ist entscheidend, dass sie funktioniert, aber nicht unbedingt, dass es wahr ist. Um hingegen als anerkanntes (disziplinäres) wissenschaftliches Wissen zu gelten, muss es als (zumindest vorläufig) wahr eingestuft werden.¹⁷

Schließlich ist es sinnvoll zu unterscheiden zwischen (Teil-)Disziplinen (z.B. (Kern-)Physik), wissenschaftlichen Spezialgebieten¹⁸, beide mit auf ein theoretisches Integrationsniveau¹⁹ bezogenen Theorien und Modellen und gegebenenfalls einem kognitiven Kern(paradigma)²⁰, pragmatisch und interessenbedingt um eine gemeinsame integrierende Problemstellung organisierten Fächern²¹ (z.B. Agrarwissenschaften)²² und um Problemzusammenhänge zentrierten Forschungsfeldern, die aufgrund parallel laufender politischer, (wirtschaftlicher) und Wissenschaftlerinteressen (an Finanzierung) entstehen und deren Angehörige zumeist weiterhin primär in ihren jeweiligen Heimatdisziplinen verankert bleiben (z.B. künstliche Intelligenz).²³

-
- 17 Bei der Behauptung der Dominanz des Wahrheitskriteriums im wissenschaftlichen Geltungszusammenhang handelt es sich letztendlich auch um den empirisch gestützten Glauben an eine normative Vorgabe.
- 18 Specialties (vgl. Chubin 1976) bezeichnen die eigentlichen wissenschaftlichen Kommunikationszusammenhänge im zunehmend spezialisierten Wissenschaftsbetrieb, in denen über Entstehungs- und Geltungszusammenhang von Forschung und ihren Ergebnissen entschieden wird. Specialties formen und validieren dabei Disziplinen, stellen jedoch kaum je selbst genuine Disziplinen, sondern allenfalls Subdisziplinen oder auch (multidisziplinäre) problemorientierte Forschung dar.
- 19 Auf dieses hin wird das materiale Feld der Erfahrungsgegenstände eingegrenzt, „um die Phänomene und Ereignisse der ausgewählten Gegenstandsaspekte in Theorieentwürfen, Als-of-Modellen oder letztlich die betreffenden Sachverhalte der Wirklichkeit zu verstehen, zu erklären, vorherzusagen, praktisch zu nutzen, zu ändern.“ (Heckhausen 1987:132)
- 20 Im Wesentlichen sind heute Disziplinen nur mehr die relevanten sozialen Einheiten der Lehre, Specialties hingegen die relevanten sozialen Einheiten der Forschung. Daher ist heute die Relevanz von Disziplinen als epistemischer, sozialer und kultureller Kontext der Forschung begrenzt, ohne allerdings ihren für das Wissenschaftssystem strukturstabilisierenden, professions- und adressenbezogenen Stellenwert zu verlieren. Deshalb können sich Fachgemeinschaften unter Bezug auf ganz unterschiedliche Wissensbestände bilden.
- 21 Den ca. 4000 Fächern stehen vielleicht 20 bis 30 Disziplinen im Sinne von (vom Erkenntnisstand der Fächer bestimmten) Disziplinaritäten gegenüber (vgl. Heckhausen 1987).
- 22 Aus der Verknüpfung disziplin- und problembezogener analytischer Differenzierungen wird plausibel, dass Fächer durchaus auch entlang technischer und selbst praktischer Probleme organisiert und strukturiert sein können (z.B. Maschinenbau, Agrarwissenschaft, Medizin), Disziplin(arität)en hingegen kaum.
- 23 In Abgrenzung gegenüber dem üblichen lockeren, Disziplinen und Fächer oder gar Forschungsgebiete synonym verwendenden Sprachgebrauch hebt die Unterscheidung von Disziplinen, Fächern und Forschungsfeldern darauf ab, dass Disziplinen auf einer (theoretisierbaren) konzeptionellen Grundperspektive beruhen, auf die hin all ihre (empirischen) Untersuchungen interpretiert werden – also physische, chemische, psychische oder soziale Qualitäten in Physik, Chemie, Psychologie oder Soziologie –, während Fächer von einer oder mehreren Disziplinaritäten bestimmt sind, um einen sie konstituierenden Problem- und/oder Gegenstandsbereich untersuchen zu können – also z.B. die Beobachtung, Analyse und theoretische Behandlung atmosphärischer Phänomene und Prozesse mithilfe im Wesentlichen physikalischer und chemischer Theorien in der Meteorologie. Während Fächer typischerweise insbesondere im Hinblick auf ein abgegrenztes (wohldefiniertes) Lehrgebiet und Studiengang institutionell verankert sind, trifft dies für Forschungsfelder nur selten zu, in denen die Erforschung bestimmter (wissenschaftsextern und auch -intern definierter) Problemzusammenhänge mithilfe diesbezüglich kooperierender wissenschaftlicher Spezialgebiete, Disziplinen oder Fächer im Vordergrund steht. – Demgegenüber heben in systemtheoretischer Perspektive etwa Stichweh (1992, 2003) und Luhmann (1990) bei ihrer Diskussion wissenschaftlicher Disziplinen ab auf kommunikative Anschlussfähigkeit und soziale Verankerung, ohne allerdings Disziplinen und Fächer begrifflich klar gegeneinander abzugrenzen. Da Disziplinen auch weiterhin Wissenschafts- und Erziehungssystem mit der Gestaltung (disziplinärer universitärer) Curricula und via beruflicher Professionalisierung systematisch miteinander verbinden und vielfach die Anlaufadresse für (weniger spezialisierte) wissenschaftsexterne Nachfrage nach Wissen bilden, sieht Stichweh keine Auflösungstendenzen der zentralen strukturbildenden Rolle von Disziplinen als der sozialen und kognitiven Einheit der Wissensproduktion in der Wissenschaft, insofern sich gerade auch problemorientierte interdisziplinäre Forschung disziplinär verorte.

Interdisziplinarität kann die (problembezogene) Verknüpfung von Forschungsergebnissen aus – oder (weitergehend) von Forschung innerhalb – einer Disziplin oder in verschiedenen Disziplinen sein, und sie kann (in seltenen Fällen) zur Entstehung einer neuen Disziplin führen. Entsprechend lassen sich mit Heckhausen (1987:138ff) drei Pole interdisziplinärer Forschung unterscheiden: Intradisziplinarität, wo mehrere, disziplinär zumindest verwandte Fächer mit ähnlichen Forschungsfragen (in Bezug auf die Lösung und/oder Erweiterung einer wissenschaftlichen, technischen oder selten auch praktischen Problematik) zusammenarbeiten, Multidisziplinarität, wo „Fächer mit deutlich unterschiedlicher Disziplinarität sich zusammenfinden und einen gemeinsamen Gegenstand des materialen Feldes aus der jeweilig fachspezifischen Perspektive des Gegenstandsaspekts und des theoretischen Integrationsniveaus beleuchten sowie abschließend die so gewonnenen Erkenntnisse facettenartig zusammensetzen, aber nicht irgendwie amalgamieren.“²⁴, und Chimären-Disziplinarität, wo nicht nur auf der Ebene gemeinsamer Annahmen und Forschungsziele, eines konsentierten Analyserasters oder gar einer aufeinander abgestimmten Methodologie, sondern auf der Ebene von (selektiver) Theorieintegration aus verschiedenen Disziplinen eine neue Disziplin entsteht (vgl. Conrad 1999, 2002).²⁵ Je weiter allerdings die theoretischen Integrationsniveaus verschiedener Disziplinen auseinander liegen, umso schwerer sind sie aufeinander beziehbar oder gar integrierbar und umso wahrscheinlicher „werden Zeugungsversuche von Disziplinaritäts-Chimären, sollten sie gelegentlich stattfinden, immer auch gleich deren baldige Abtreibung auf den Plan rufen.“ (Heckhausen 1987:141)

Im Wesentlichen erzeugen wissenschaftliche Produktionsgemeinschaften wissenschaftliches Wissen, überprüfen es auf seine Qualität und Richtigkeit hin, integrieren es in den existierenden Wissensbestand, verwenden es in nachfolgenden (wissenschaftlichen) Produktionsprozessen weiter, und konstituieren sich über diese Prozesse als wissenschaftliche Gemeinschaft.²⁶

Vor diesem analytischen Hintergrund lautet die zentrale, eingangs formulierte Hypothese dieser Studie nun: Bei unterschiedlich weitem Forschungshorizont und -fokus und bei unterschiedlicher klimapolitischer Wirksamkeit und Umsetzung ihrer Ergebnisse und Schlussfolgerungen stellen Ozonforschung und Klimaforschung einen Beleg dar für die wachsende Vorherrschaft problemorientierter Wissenschaft. Wenn hinreichender externer (gesellschaftlicher) Problemdruck und Interesse besteht und demgemäß die erforderliche, deutlich überdurchschnittliche Ressourcenzufuhr

24 „Hier sind die Fächer nicht miteinander kopulationsfähig, wohl aber kooperationsfähig. Es kann demnach auch keinen Nachwuchs in Gestalt einer intermediären Disziplinarität zwischen multidisziplinären Eltern geben.“ (Heckhausen 1987:139) Dabei ist in den „positivistischen“ Naturwissenschaften „das Gespür für die Disziplinarität im Sinne eines bestimmten theoretischen Integrationsniveaus vermutlich ausgeprägter als in ihrem Gegenstück, den hermeneutischen Wissenschaften.“ (Heckhausen 1987:140)

25 Demgegenüber unterscheidet Luhmann (1990:457ff) pragmatisch-nüchtern drei völlig verschiedene Reaktionen auf die Ausdifferenzierung von Disziplinen innerhalb des Wissenschaftssystems: okkasionelle, temporäre und transdisziplinäre Interdisziplinarität, womit zufällige Anstöße und Übernahmen aus anderen Disziplinen, projektbezogene, zeitlich begrenzte Kooperationen verschiedener Disziplinen und neue querliegende Disziplinen mit eigenem Paradigma wie die Kybernetik bezeichnet werden.

26 Mit Gläser (2006:263) lassen sich die wichtigsten Merkmale der kollektiven Produktion in wissenschaftlichen Gemeinschaften folgendermaßen zusammenfassen. „Die Produktion beruht auf *autonomen Entscheidungen der Produzenten* darüber, welcher Beitrag gebraucht wird, dass sie diesen Beitrag erzeugen können, und wie sie dabei vorgehen. Diese *Entscheidungen orientieren sich am gemeinsamen Wissensbestand* der Gemeinschaft, der zugleich Arbeitsgegenstand, Arbeitsmittel und kollektives Produkt ist. Neue Beiträge zum Wissen der Gemeinschaft werden *öffentlich angeboten* und in den Wissensbestand eingefügt, indem *sie in der weiteren Wissensproduktion verwendet* werden. Diese Verwendung in nachfolgenden Produktionsprozessen ist zugleich die wichtigste Form der *Qualitätskontrolle* für Wissen. *Regeln und Standards* für Praktiken der lokalen Wissenserzeugung *erhöhen die Verlässlichkeit und Passfähigkeit* angebotener Beiträge. Der *Peer review* von Projekten und Angeboten *harmonisiert individuelle Perspektiven mit dem mainstream der Gemeinschaft* und verbessert so die Verwendbarkeit individueller Beiträge. Die *Mitgliedschaft* in diesem kollektiven Produktionssystem wird durch *die Orientierung der eigenen Produktion am Wissensbestand der Gemeinschaft* konstituiert.“

gesichert ist, wenn ausreichende grundagentheoretische, wissenschaftlich interessante Optionen bestehen, und wenn diese wissenschaftsinternen und externen Interessenkopplungen über entsprechende Grenzorganisationen und Assessments organisiert und strukturell verankert werden, sodass sowohl Transfer, Interpretation und Kontextualisierung wissenschaftlichen Wissens als auch die Berücksichtigung von Stakeholder-Perspektiven und -Interessen gewährleistet sind, ohne dass die Autonomie und die damit zusammenhängende Glaubwürdigkeit der Wissenschaft, über den Geltungszusammenhang ihrer Forschungsergebnisse zu entscheiden, infrage gestellt wird, dann ist problemorientierte Wissenschaft in der Lage, auf die Dauer ein praktisches (gesellschaftliches) Problem dann erfolgreich in wissenschaftliche und auch technische Probleme zu übersetzen, diese zu behandeln und zu lösen, und die Problemlösungsstrategien zu evaluieren und zu kommunizieren. Falls es in einem solchen, vor allem anfangs offenen und in dieser Hinsicht kaum organisierten Entwicklungsprozess zu im Wesentlichen positiven Rückkopplungen dieser Einflussfaktoren kommt, dann vermag ein problemorientiertes Forschungsfeld wie die Ozon- oder die Klimafor-schung eine wissenschaftliche Eigendynamik zu entwickeln, die die Klärung offener wissenschaftlicher Fragen, die Schließung von wissenschaftlichen Kontroversen und die Ausbildung eines kohärenten Gesamtbildes des Forschungsfeldes und eines weitreichenden wissenschaftlichen Konsenses tendenziell forciert und beschleunigt.

3 Ozonforschung

Der atmosphärischen Ozonforschung geht es um die Beschreibung und (kausale) theoretische Erklärung des (stratosphärischen) Ozonhaushalts durch das Zusammenspiel der ihn bestimmenden Einflussgrößen einschließlich der Wechselwirkungen der aus ihnen resultierenden Prozesse, wobei aufgrund seines jüngeren Entstehungszusammenhangs nach 1970 besonderes Augenmerk auf das Verständnis des anthropogen verursachten Ozonabbaus gerichtet wurde. Es handelt sich dabei zunächst um eine molekülbezogene analytische und keine wissenschaftstheoretisch oder -soziologisch begründete Abgrenzung eines Forschungsbereichs, der diejenigen Forschungen umfasst, die sich in der einen oder anderen Weise auf Ozon (O_3) beziehen. Dass sich insbesondere im Zuge der gesellschaftlich als relevant definierten Frage des stratosphärischen Ozonabbaus begrenzt eine sozial ausdifferenzierte ‚scientific community‘, d.h. eine Specialty der Ozonforschung bildete, rechtfertigt den Begriff der Ozonforschung auch auf sozialer Ebene.

Die Relevanz dieser auf den wissenschaftlichen Erklärungskontext abzielenden Abgrenzung wird deutlich, wenn die zu Ozonproblem²⁷ und Ozonregime zählenden Forschungsfelder angeführt werden, die nicht der Ozonforschung zuzurechnen sind und daher hier nicht weiter betrachtet werden.

1. Die erst in den 1980er Jahren gesicherte genauere Kenntnis des Volumens der produzierten und der in die Troposphäre emittierten Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKWs) und der Art ihres Transports in die Stratosphäre ist notwendig, um ihre (zukünftige) Menge und Konzentration

27 Die das Ozonproblem beschreibende, inzwischen wissenschaftlich abgesicherte Risikohypothese setzt sich im Wesentlichen aus folgenden Komponenten zusammen: „(1) Die Senke kann kein erdnaheer Kreislauf sein, da die FCKWs physikalisch-chemisch stabil und nicht in Wasser löslich sind. Sie wandern in die nächste Atmosphärenschicht, die Stratosphäre. (2) In der Stratosphäre hat die UV-Strahlung eine andere Zusammensetzung und enthält mehr kurzwellige Strahlung. (3) Kurzwellige Strahlung bricht die FCKWs an der Bindung zum Chlor auf. (4) Chlor-Radikale katalysieren den Ozonabbau. (5) Ozon schützt die Erde vor kurzwelliger UV-Strahlung. (6) Kurzwellige UV-Strahlung erzeugt u.a. Hautkrebs.“ (Bösch 2000:45)

on in der Stratosphäre abschätzen zu können, wo insbesondere das zum katalytischen Ozonabbau²⁸ entscheidend beitragende Chlor (Cl) photolytisch freigesetzt wird. Diese Kenntnis betrifft jedoch nur eine von ihm unabhängige Randbedingung des Ozonabbaus und nicht seine chemischen oder dynamischen Mechanismen, außer dass FCKWs als Treibhausgase die Temperatur der Stratosphäre mitbestimmen, die den Ozonabbau beeinflusst.²⁹

2. Substitute von FCKWs und sie vermeidende alternative Produktionsprozesse wurden von der Industrie u.a. im Rahmen des Technology and Economic Assessment Panel (TEAP) des internationalen Ozonregimes nach Verabschiedung des Montreal-Protokolls gezielt gesucht und entwickelt und trugen entscheidend zu seiner Umsetzung bei. Diese sind für das stratosphärische Ozon nur insofern relevant, als sie selbst noch ein gewisses Ozon-zerstörungspotenzial (ozone depletion potential: ODP) besitzen oder als Treibhausgase indirekt die Temperatur der Stratosphäre beeinflussen.
3. Die gesundheits- und umweltschädigenden Effekte einer erhöhten UV-Strahlung auf der Erdoberfläche (vgl. z.B. BMBF 2000, EU-Commission 2001, WMO 2003, 2007) stellen die (für den Menschen) entscheidenden Folgewirkungen des Ozonabbaus dar, lassen sich jedoch völlig unabhängig von diesem wissenschaftlich untersuchen und bestimmen, ohne irgendeinen Einfluss auf die Erklärung von Reaktionen des stratosphärischen Ozons zu nehmen.³⁰

Bei der historischen Entwicklung der Ozonforschung lassen sich, teils in Anlehnung an Stolarski (2001), sechs aufeinander folgende Phasen unterscheiden, die gerade die verschiedenen Stufen im zunehmenden wissenschaftlichen Verständnis und den Messmöglichkeiten von vor allem *atmosphärischem* Ozon prägnanter hervortreten lassen:³¹

1. Entdeckung des Ozons und Bestimmung seiner Eigenschaften (~1840 - ~1880)
2. Lokalisierung von Ozon in der Stratosphäre und seine Absorption der UV-Strahlung (~1880 - ~1930)
3. Theorie und Quantifizierung der atmosphärischen Ozonverteilung (~1930 - ~1965)
4. Katalytischer Ozonabbau (~1965 - ~1985)
5. Ozonloch und umfangreiche Ozonforschungsprogramme (~1985 - ~2000)
6. Übergang zu normal science und reduzierter Forschungsförderung (ab ~2000).

Nachfolgend werden die die jeweiligen Phasen kennzeichnenden Forschungsaktivitäten, -programme, -institutionen und -ressourcen zusammenfassend dargestellt.

In der ersten Phase (~1840 - ~1880) betraf die Ozonforschung die Identifikation, Konzentration, räumliche Verteilung und sodann die chemische bzw. atomare Struktur des Ozons (in der Umge-

28 In katalytischen Abbauzyklen wird das katalytisch wirkende Element am Ende nicht verbraucht, sondern stets wieder freigesetzt; so kann es wiederholt und damit vielfach zum Abbau etwa von Ozonmolekülen beitragen.

29 Die Entdeckung der FCKWs als Kühlmittel durch Midgley 1928 und ihre anschließende massive und viel-fältige Nutzung stellen zweifellos die entscheidende Voraussetzung des seit 1980 beobachtbaren stratosphärischen Ozonabbaus dar, haben jedoch als solche noch nichts mit theoretischen Fragen der Ozonforschung zu tun.

30 Die diesbezügliche UV-Forschung schlägt sich im vorletzten WMO-Assessment (WMO 2003) in immerhin über 40% der insgesamt zitierten, peer revieweden Veröffentlichungen nieder.

31 Mit dieser Unterscheidung unterschiedliche Entwicklungsniveaus markierender Phasen werden weder die Eindeutigkeit ihrer Festlegung noch (jenseits relativ kontinuierlicher Entwicklung) Entwicklungsbrüche bei den Phasenübergängen behauptet.

bungsluft) sowie die Entwicklung und Kalibrierung geeigneter Messverfahren. Ihr wissenschaftlicher Kontext war insbesondere die Sauerstoffchemie.

In dieser Hinsicht entwickelten sich rasch vielfältige Forschungsaktivitäten, aber keine, über Forschungsschwerpunkte (universitärer) Institute hinausgehenden genuinen Ozonforschungsprogramme im heutigen Sinne. Der soziale Rahmen der Ozonforschung war die internationale (damals im Wesentlichen europäische) Wissenschaft auf Institutsebene, wobei sich die aus an die 100 Personen bestehende Gemeinschaft der Ozonforscher allenfalls analytisch als eigene Specialty abgrenzen lässt, insofern sich die jeweiligen Forscher nicht nur vorrangig mit Ozon befassten.³²

Die für die Ozonforschung verfügbaren Ressourcen entsprachen im Grundsatz der damals üblichen universitären Ausstattung, waren jedoch in diesem Rahmen von beträchtlicher Höhe, und dürften wahrscheinlich eine Größenordnung von immerhin mehreren Mio. € jährlich erreicht haben.³³

Vor dem Hintergrund der damaligen Hochzeit in der Entwicklung der Chemie auf kognitiver und institutioneller Ebene war das primäre Erkenntnisinteresse wohl genuine wissenschaftliche Neugierde (verbunden mit dem Interesse an wissenschaftlicher Reputation), die sich auf Vorkommen, Struktur, theoretische Erklärung und Nachweismethoden von Ozon richtete. Hinzu kam – im Kontext der in der Gründung von technischen Hochschulen zum Ausdruck kommenden abwendungs- und technikorientierten Verbindung von wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Interessen (vgl. Böhme et al. 1978, Weingart 1976) – die potenzielle industrielle Nutzbarkeit des Ozons.

In der zweiten Phase der Ozonforschung (~1880 - ~ 1930) standen in der Sache die vertikale Verortung und genauere quantitative Bestimmung des atmosphärischen Ozons in der Stratosphäre, die Entdeckung seiner Absorption der UV-B Strahlung und die Entwicklung entsprechender Nachweisverfahren (wie spektroskopische Messverfahren, hochfliegende Ballone) im Vordergrund. Die hierbei zum Tragen kommenden erklärenden Theorien für diese nunmehr vorrangig als Atmosphärenforschung zu verstehende Ozonforschung waren im Wesentlichen chemischer und physikalischer Natur, die in ihrer Provenienz bis heute unverändert das Zentrum theoretischer Erklärung in der Ozonforschung bilden: chemische Zusammensetzung und Reaktionen, Photophysik und Photochemie, Strömungsphysik, Energiebilanzen, Mikrophysik.

Gegenüber der ersten Phase zeichnete sich der soziale Rahmen der Ozonforschung durch Erweiterung und Verdichtung der weiterhin grundsätzlich international und akademisch geprägten Forschungsaktivitäten und -institutionen und die wachsende Rolle von Messplattformen und -instrumenten bis hin zur Etablierung eines koordinierten europäischen Netzwerks von Ozon-Messstationen 1927 aus, bezüglich derer auch anwendungsorientierte (meteorologische) Beobachtungsroutinen von Bedeutung waren. Entsprechend stiegen die benötigten Forschungsmittel und dürften das Äquivalent von jährlich 5-10 Mio. € sicherlich erreicht haben. Bei kognitiv (und sozial) nunmehr überwiegender Einbettung der Ozonforschung in Meteorologie und Atmosphärenforschung war Ozon ein wichtiger Untersuchungsgegenstand, was sich u.a. in zunehmender Spezial-

32 Immerhin kam es angesichts der Vielzahl von Ozon betreffenden Forschungs- und Veröffentlichungsaktivitäten zur Einrichtung einer Peer Review Funktionen ausübenden Kommission durch die französische Nationale Akademie der Wissenschaften.

33 Die genaueren Berechnungsgrundlagen dieser und nachfolgender Abschätzungen finden sich in Conrad 2007, Conrad 2008a und Conrad 2008b. Die Abschätzung der jeweiligen Größenordnung der Ausgaben für die Klimaforschung basiert im Wesentlichen auf der Zahl der Ozon- bzw. der Klimaforscher und der Kosten der spezifisch oder zumindest vorrangig für die Ozon- bzw. die Klimaforschung eingesetzten Forschungsinstrumente und -techniken.

sierung der mit ihm befassten Wissenschaftler und der ersten internationalen Ozonkonferenz 1929 niederschlug.

Umgekehrt bestanden praktisch keine (kognitiven und sozialen) Verbindungen zu beginnenden Forschungen im Bereich von Kälteindustrie oder von Gesundheitsschäden durch UV-Strahlung.³⁴ Das Erkenntnisinteresse der Ozonforschung war unverändert primär akademischer, wissenschaftliche Reputation versprechender Natur und richtete sich weiterhin auf Vorkommen, Struktur, theoretische Erklärung und Nachweismethoden von Ozon, jetzt allerdings im Bereich der Atmosphäre, speziell der Stratosphäre. Von daher bestanden zwar soziale Verbindungen zu einer durchaus auch anwendungsorientierten, Wetterbeobachtung und -vorhersage anstrebenden Meteorologie, die jedoch auf der kognitiven Ebene theoretischer Erklärung noch kaum Bedeutung besaßen.

In der dritten Phase (~1930 - ~1965) wiesen die sozialen Determinanten der Ozonforschung folgende Charakteristika auf:

Auf kognitiver Ebene ging es in der Ozonforschung vor allem um die im Prinzip quantitative theoretische Beschreibung des stratosphärischen Ozonhaushalts auf der Basis einfacher, nur O, O₂, O₃, Licht (und gegebenenfalls ein zur Energie- und Impulserhaltung erforderliches Partner-Molekül) berücksichtigender Reaktionsgleichungen und Zirkulationsmodelle, die chemische, photochemische und korrigierende dynamische Komponenten umfasste (Chapman, Brewer, Dobson), sowie um deren empirische Überprüfung und deren spätere Korrektur durch die Postulierung, Identifizierung und theoriebezogene Berücksichtigung katalytisch wirksamer, ozonabbauender Spurengase. Hierfür waren neue Messplattformen und -verfahren, ein globales, ausreichend kalibriertes Netzwerk von Ozon-Messstationen und der Einsatz von Rechnern mit steigenden Kapazitäten (auch für erste Modellrechnungen) Voraussetzung, die alle überwiegend erst in den 1960er Jahren verfügbar waren. Parallel wurde in den 1950er und 1960er Jahren mit wachsendem Bewusstsein von Umweltproblemen die Rolle des bodennahen Ozons in Smogsituationen untersucht und belegt (vgl. Farrell 2005, Haagen-Smit et al. 1953).³⁵

Auf sozialer Ebene gewann die im Wesentlichen stratosphärische Ozonforschung weiteres Gewicht. Diese Laborexperimente, Boden- und Ballonmessungen und erste Modellrechnungen beinhaltenden vielfältigen Forschungsaktivitäten bündelten sich teilweise auch zu monitoring-orientierten Forschungsprogrammen. Sie waren zwar einerseits weiterhin akademisch geprägt, andererseits aufgrund der benötigten aufwändigen Messtechniken jedoch zunehmend kampagnenförmig als auch bürokratisch organisiert (vgl. die Gründung der International Ozone Commission (IOC) 1948 oder die Notwendigkeit standardisierter Routinen der Datenerhebung und Berichterstattung).

Die internationale Vernetzung nahm nach dem zweiten Weltkrieg weiter zu. Dabei lässt sich zum einen nunmehr begrenzt von einer Specialty der (stratosphärischen) Ozonforschung sprechen, die zum andern aber ihren Schub aus der sich generell entwickelnden und verstärkt (zunächst aus militärischen Gründen) geförderten Atmosphären- und Wetterforschung bezog und in diese auch institutionell eingebunden war.

34 Damit kann in Übereinstimmung mit Böschen (2000) festgehalten werden, dass 1930 grundsätzlich die kognitiven Voraussetzungen gegeben waren, das durch FCKWs verursachte Ozonproblem als mögliche Folgewirkung ihrer massenhaften Produktion und Anwendung erkennen zu können, dies jedoch aufgrund der damals vorherrschenden Denkstile nicht geschah.

35 In den 1950er Jahren wurde zudem auch erstmals die Fähigkeit menschlicher Aktivitäten, natürliche Systeme und Gleichgewichte im globalen Maßstab zu beeinflussen und zu stören, wissenschaftlich thematisiert (Revelle/Suess 1957).

Die verfügbaren Forschungsressourcen nahmen insbesondere im Gefolge des Internationalen Geophysikalischen Jahres (IGY 1957-58/59 mit der bis dahin insgesamt wohl größten Feldkampagne in der Wissenschaftsgeschichte) zu und dürften sich (je nach Zuschreibung der Kosten der Messstationen) zumindest seit den 1960er Jahren auf das Äquivalent von jährlich zwischen 10 und 25 Mio. € belaufen haben.

Wenn auch die Rolle des Ozons in praktischen sozialen Problemen wie dem Ozonsmog in Ballungsgebieten oder der vor UV-Strahlung schützenden Ozonschicht zunehmend ins Bewusstsein geriet und auch genauer untersucht wurde, und zudem auch militärische und industrielle Interessen bei der Förderung der Ozonforschung von Belang waren, blieben auch in dieser Phase auf wissenschaftliche Grundlagen orientierte und begrenzt meteorologisch-anwendungsbezogene Erkenntnisinteressen die vorherrschenden.

Die vierte Phase der Ozonforschung (~1965 - ~ 1985) war gekennzeichnet durch wissenschaftliche Untersuchungen des katalytischen Ozonabbaus, durch die Frage nach seiner möglichen Verursachung durch unterschiedliche menschliche Aktivitäten und durch diesbezügliche wissenschaftliche und politische Kontroversen.

Sachlich stand der katalytisch induzierte Ozonabbau (und dessen Auswirkungen) im Vordergrund, wobei Möglichkeit und Nachweis seiner Verursachung durch menschliche Aktivitäten bzw. Technologien wissenschaftliche Orientierung und Diskurse in der Ozonforschung maßgeblich prägten. Dabei blieb sie zwar formal weiterhin an Kriterien wissenschaftlicher Wahrheit orientiert, wurde jedoch in ihren konkreten Untersuchungsfragen und Projektdesigns vermehrt an externen Zwecken ausgerichtet. Die dahinter stehenden Interessen und Weltbilder (vor allem, aber nicht nur der FCKWs herstellenden und nutzenden Industrie) schlugen zudem in der Hochphase ungesicherter Befunde und kontroverser Erklärungen (ca. 1974-86) auch eindeutig auf die (in den Vordergrund gestellten) inhaltlichen Forschungsergebnisse durch.³⁶

Dies war innerhalb des wissenschaftlichen Diskurses möglich und nicht illegitim, weil in der notwendigen Beweiskette die entsprechenden Befunde zunächst nicht empirisch gesichert waren, sondern teils nur theoretisch postuliert wurden, Messergebnisse abhängig von Messplattform, -instrument und -zeitpunkt differierten, Modellrechnungen teils zu anderen Ergebnissen kamen oder vom Status quo abweichende Ozonwerte erst in (fernerer) Zukunft zu erwarten waren. Denn für die weitgehend lückenlose Beweisführung des durch FCKWs verursachten Ozonabbaus bedurfte es des empirischen Nachweises insbesondere sämtlicher nachfolgender Tatbestände: Existenz von FCKWs in der Stratosphäre – primär human bedingte Quellen atmosphärischer FCKW-Emissionen – Transport von FCKWs in die Stratosphäre – lange Lebensdauer von FCKWs in der Stratosphäre – Freisetzung von Chlorradikalen – Existenz chlorinduzierter katalytischer Reaktionen – zentrale Rolle dieses chlorinduzierten katalytischen Ozonabbaus – tatsächlich messbare Verringerung der stratosphärischen Ozonschicht – Gültigkeit und Relevanz dieser katalytischen Reaktionen auch für andere Halone.

Die zur Schließung der infolge ihrer gesellschaftspolitischen und ökonomischen Relevanz heftigen wissenschaftlichen Kontroversen erforderlichen Mechanismen wie Mobilisierung autoritativen Expertenwissens, Standardisierungsprozesse, Schlüsselexperimente (vgl. Grundmann 1999) benötig-

36 Bis hin zur institutionellen Zugehörigkeit vieler beteiligter Wissenschaftler macht die in den Vordergrund drängende Frage des durch FCKWs ausgelösten Ozonabbaus in der Stratosphäre deutlich, wie die Motive seiner Untersuchung nicht mehr primär akademischer, sondern ebenso sehr gesellschaftspolitischer Natur waren und sind. Die vielen am Ozondiskurs maßgeblich beteiligten Institutionen, die parallel laufenden Anstrengungen um (internationale) Regulierung und die Abwehrstrategien der FCKW-Hersteller (vgl. Cagin/Dray 1993, Cook 1996, Dotto/Schiff 1978, Johnston 1992, Liftin 1994, Parson 2003, Roan 1990) belegen, dass es sich beim Ozonproblem um ein sozial definiertes praktisches Problem handelt.

ten beträchtliche Ressourcen und waren angesichts der konfligierenden vested interests nicht verfügbar, sodass sich zumindest kurzfristig keine dominante Erklärung herausbilden konnte. Hierbei spielten wiederum verbesserte Messmöglichkeiten, wie die systematische Gewinnung satellitenbasierter Messdaten, eine zentrale Rolle, etwa bei der Untersuchung von Spurengasen und deren katalytischer Reaktionen. Zugleich fanden zweidimensionale, meridionale Zirkulation einbeziehende Modelle der stratosphärischen Chemie Eingang in den wissenschaftlichen Diskurs (Miller et al. 1981).

Neben den in der Ozonforschung teils bereits etablierten wissenschaftlichen Institutionen spielten nunmehr auch Forschungsinstitutionen von Militär, Luftfahrt und chemischer Industrie eine Rolle, die sich mit von ihren Vorhaben und Produkten (Raumfähre, Überschallflugzeuge, FCKWs) möglicherweise verursachten Risiken für die stratosphärische Ozonschicht befassten. Dabei entwickelte sich insbesondere die NASA (National Aeronautics and Space Administration) zur (amerikanischen) lead agency in der Ozonforschung, indem sie diese (anfangs eher zufällig) nutzte, um sich in den 1970er Jahren qua Satellitenentwicklung und -messungen in der Umweltforschung gesetzlich verankert entsprechend zu positionieren, die ihr zur Verfügung stehenden beträchtlichen Ressourcen in Verbindung mit ihrem administrativen und politischen Rückhalt und mithilfe eines hochkompetenten, als policy entrepreneur agierenden Leiters ihres Upper Atmosphere Research Programms (Watson) zur Schaffung hinreichender eigener wissenschaftlicher Kompetenz und zur Durchführung von Schlüsselkampagnen wie NOZE I und II einzusetzen, durch kooperative Einbindung (konkurrierender) Institutionen und Internationalisierung ihre (wissenschaftspolitische) Position zur Geltung zu bringen und zur Schaffung autoritativer Assessments entscheidend beizutragen (vgl. Lambright 2005).³⁷ Außerdem verlangte die von einigen politischen Akteuren angestrebte Regulierung und Einschränkung von FCKW-Produktion und -Nutzung angesichts der kontroversen Positionen zu ihrer Rechtfertigung nach möglichst eindeutigen wissenschaftlichen Befunden. Daraus resultierte gleichfalls eine erhöhte Nachfrage nach Studien und (potenziell) autoritativen Assessments der Ozonforschung³⁸, die sich partiell in nationalen und internationalen Forschungsprogrammen niederschlugen.

Zusammengenommen dürften diese Anforderungen an die Ozonforschung weltweit mit in dieser Phase vermutlich ca. 50 Mio. € an jährlichen Forschungsmitteln einhergegangen sein.

In ihrem Charakter entwickelte sich die Ozonforschung von einer vor allem (spezielle Fragen behandelnden) akademischen zu einer primär problemorientierten Forschung, deren Themen und Untersuchungsdesigns zunehmend stark entlang gesellschaftspolitisch definierter Problemlagen formuliert wurden, innerhalb derer erst genuin wissenschaftliche Forschungsfragen und -methoden ihren vorrangigen Stellenwert erlangten. Diese Problemorientierung kam und kommt auch in der (an wissenschaftsexterne Rezipienten gerichteten) Verknüpfung unterschiedlicher, das Ozonproblem betreffender Forschungsergebnisse in Reviews, Studien und wissenschaftlichen Panels zum Ausdruck, während auf Forschungsebene beispielsweise die Suche der Industrie nach FCKW-

37 Die – auf der Basis der gemeinsamen Orientierung und Zusammenarbeit von Watson und Tolba – von der NASA zusammen mit UNEP (United Nations Environment Programme) maßgeblich initiierten WMO-Assessments führen die NASA stets als maßgeblich beteiligte Institution auf und wurden anfangs häufig NASA/WMO- oder WMO/NASA-Assessments genannt (Liftin 1994:82).

38 Es sind gerade solche autoritativen scientific Assessments, über die wissenschaftliche Befunde und Schlussfolgerungen der politischen Etablierung des Ozonregimes mit zum Durchbruch verhalfen. Ohne diese allgemein akzeptierten Review-Berichte waren weitergehende Regulierungsmaßnahmen für die Mehrzahl der involvierten politischen Akteure nicht nur wegen möglicher wirtschaftlicher Kosten zu riskant. Dabei erreichte erst der 1985 erstellte WMO-Report 16 (WMO 1986) einen entsprechenden, auch außerhalb der Wissenschaft (in den Verhandlungen zur Etablierung eines substanziiell fundierten internationalen Ozonregimes) akzeptierten Status anerkannter wissenschaftlicher Befunde (vgl. Parson 2003), den vorangehende Untersuchungsprogramme und Assessment-Aktivitäten noch nicht erlangten.

Substituten oder die Erforschung diverser (schädlicher) Effekte der UV-B Strahlung nichts mit der Analyse von z.B. Zirkulation, Spurengasen, katalytischen Zyklen oder heterogenen Reaktionen in der stratosphärischen Ozonforschung zu tun hat(te).³⁹

In der fünften Phase (~1985 - ~2000) war die Ozonforschung geprägt von der vergleichsweise raschen wissenschaftlichen Erklärung des nicht erwarteten antarktischen Ozonlochs durch heterogene Reaktionen bei hinreichend tiefen Temperaturen, bei zügiger Ausscheidung konkurrierender theoretischer Erklärungen, von der intensiven Erforschung und allmählichen hinreichenden Klärung der wesentlichen mit stratosphärischem Ozon verbundenen Prozesse und von der verstärkten Einbeziehung von Klima-Chemie-Wechselwirkungen. Wiederum kamen verbesserte, vielfältigere, aufeinander abgestimmte Messverfahren zum Tragen, deren jeweilige Reliabilität und Validität verstärkt systematisch evaluiert wurden. Schließlich wurden erste dreidimensionale, dynamische, chemische und Strahlungsprozesse miteinander koppelnde Modelle entwickelt. Darüber hinaus gewann die Untersuchung und Ankopplung des troposphärischen Ozonhaushalts an Bedeutung, sodass insgesamt zunehmend komplexere Erklärungsmodelle und Theorien bevorzugt wurden und werden.

Demgemäß kam es sowohl wissenschaftsintern als auch im Großen und Ganzen wissenschaftsextern zur weitgehenden Beendigung von (wissenschaftlichen) Kontroversen und zur Herausbildung eines mehr oder minder etablierten Konsenses über wissenschaftliche Tatbestände, erklärende Theorien und offene Fragen mit wissenschaftsextern durchweg akzeptierten autoritativen Assessments, insbesondere der entsprechenden Assessment Panels der UNEP und der World Meteorological Organization (WMO).⁴⁰ Die internationale Kooperation, die Etablierung und Fortsetzung von (satellitengestützten) Monitoring-Systemen (wie GAW und NSDC), Review-Prozesse sowie wissenschaftliche und technisch-wirtschaftliche Politikberatung (wie in den entsprechenden UNEP/WMO-Panels) wurden durch politisch forcierte Forschungsprogramme gefördert. Dabei bildete sich auch eine Vielzahl von mehr oder minder mit Ozonforschung und Datenerhebung befassten nationalen, europäischen und internationalen Forschungsgruppen und Organisationen heraus. Die für die Ozonforschung verfügbaren Ressourcen erreichten in dieser fünften Phase mit jährlich wohl mindestens 100 Mio. € ihren Höhepunkt.⁴¹

Bei aller Verflechtung von wissenschaftlichen, technischen, wirtschaftlichen und politischen Anliegen herrschte ab Ende der 1980er Jahre nach der Herausbildung einer dominanten, wissenschaftsintern durchgängig und wissenschaftsextern überwiegend akzeptierten Erklärung des Ozonproblems eine Kombination von grundlagenorientierter Ozonforschung und extensiver Datenerhebung in Kampagnen und Monitoring-Programmen vor.⁴² Für deren Durchführung war die sich sozial in gewissem Ausmaß herausgebildet habende Specialty der Ozonforscher zuständig. Die Arbeit in (politikberatenden) Kommissionen und die Entwicklung von FCKW-Substituten verliefen hierzu parallel. Strategische (wissenschafts-externe) Einflussnahme auf die Ozonforschung betraf

39 Diese sachlich naheliegende Aufteilung wird durch disziplinäre Grenzen und die Struktur der Forschungsfinanzierung meist noch verstärkt.

40 Heute sind dies das Scientific Assessment Panel (SAP), das Technology and Economic Assessment Panel (TEAP) und das Environmental Assessment Panel (EAP).

41 Schon die Entwicklung des vorrangig der Ozonforschung dienenden UARS (upper atmosphere research satellite) der NASA, im Wesentlichen in der Zeit 1984 - 1991, kostete 750 Mio. \$ (Lambright 2005:29). Watson schätzte die Gesamtausgaben allein der NASA für die Ozonforschung (einschließlich der Satellitenentwicklung) in 1987 auf 100 Mio. \$ (Liftin 1994:85).

42 Analoges gilt für die UV-Forschung.

vor allem die prioritäre Untersuchung von im Montreal-Protokoll und seinen Ergänzungen zukünftig nicht mehr erlaubten FCKWs und ihrer Substitute, wie ihr ODP und GWP (global warming potential), und beschränkte sich (ansonsten) auf ihre (auf das Ozonproblem fokussierende) Grundausrichtung und auf das Engagement der Förderinstanzen positiv würdigende Berichtsformulierungen. Selbst die executive summaries der Assessments und der zusammenfassenden Programmberichte waren und sind zwar auf kompakte Verständlichkeit hin formuliert (Ergebnis- statt Theoriepräsentation), aber kaum geschönt.

Zusammenfassend ist für diese fünfte Phase festzuhalten:

1. Mit Beginn der 1990er Jahre waren die wesentlichen, den stratosphärischen Ozonhaushalt bestimmenden chemischen und dynamischen Prozesse im Kern (qualitativ und vielfach in ihrer quantitativen Größenordnung) theoretisch verstanden und empirisch nachgewiesen. Ihre detaillierte (quantitative) Analyse war vorrangige Aufgabe der Ozonforschung der 1990er Jahre. Diese Aussage gilt nicht für das troposphärische Ozon.
2. Die Durchführung der Ozonforschungsprogramme und -kampagnen war auf der Basis einer massiven Forschungsförderung und intensiven (internationalen und multidisziplinären) wissenschaftlichen Kooperation möglich.
3. Die ausgiebigen institutionalisierten und kontinuierlichen, in autorisierte scientific Assessments mündenden, ihre nichtwissenschaftlichen Adressaten berücksichtigenden wissenschaftlichen Review-Prozesse stärkten die (auf das Ozonregime bezogene) Position der Wissenschaft und dienten als maßgebliches, tatsachenorientiertes, Kontroversen unterbindendes Transfermedium für die Berücksichtigung wissenschaftlichen Wissens in außerwissenschaftlichen (politischen) Verhandlungs- und Entscheidungsprozessen (vgl. Andersen/Sarma 2002, Grundmann 1999, LePrestre et al. 1998, Parson 2003).
4. Für die allmähliche Beseitigung von FCKW-Emissionen in die Atmosphäre wurde ein material wirksames, sukzessive verschärftes internationales Umweltregime etabliert, das in der internationalen und globalen (Umwelt-)Politik häufig als (nachzueiferndes) Erfolgsbeispiel eingestuft wurde und wird (vgl. Andersen/Sarma 2002, Benedick 1991, 1998, Clark/The Social Learning Group 2001, Conrad 1995, Grundmann 1999, 2001, Le Prestre et al. 1998, Mitchell et al. 2006, Oberthür 1997, Oberthür/Ott 1999, O'Riordan/Jäger 1996, Victor et al. 1998, Young 1999).
5. Das Ozonregime trägt im Verbund mit nationalen Regulierungen und Anstrengungen der Industrie maßgeblich dazu bei, dass ozonschädigende FCKWs kaum mehr hergestellt und substituiert werden und eine Regeneration der stratosphärischen Ozonschicht in den kommenden Dekaden stattfinden kann.

Nachdem mit Beginn der 1990er Jahre grundlegende Zusammenhänge des stratosphärischen Ozonhaushalts wissenschaftlich überwiegend geklärt waren und bis um 2000 in extensiven Forschungsprogrammen und -kampagnen genauer untersucht und weitgehend substanzial abgesichert wurden⁴³, geht es in der laufenden sechsten Phase der Ozonforschung seit 2000 im Sinne von normal science um die Einrichtung und Vervollständigung globaler Datenbanken und um das Zusammentragen weiterer Mosaikbausteine. Die Forschungsaktivitäten betreffen im Wesentlichen die Fortführung laufender Monitoring-Programme, insbesondere im Hinblick auf eine Regeneration der stratosphärischen Ozonschicht, die Erhebung und Auswertung von der Klärung spezifischer Phänomene und Forschungsfragen dienenden Daten mithilfe verfügbarer (zusätzlicher) Messplatt-

43 Dies trifft für die UV-Forschung nicht zu.

formen und -instrumente, die Durchführung aufeinander abgestimmter Laborexperimente, Feldmessungen und Modellierungsarbeiten in gemeinsamen Forschungsprojekten, die Entwicklung komplexer, detaillierter, dynamische und chemische Wechselwirkungen einbeziehender theoretischer Erklärungen atmosphärischer Phänomene und Messwerte, um zu einem angemessenen Verständnis von Ozonhaushalt und Ozonwerten zu gelangen, und die Verstärkung der troposphärischen Ozonforschung. Daneben laufen UV-Strahlung oder ihre Wirkung untersuchende Forschungsarbeiten weiter (vgl. BMBF 2000, EU-Commission 2001, WMO 2003, 2007), während die Entwicklung von FCKW-Substituten nach diesbezüglichen intensiven Anstrengungen in der fünften Phase allmählich an Bedeutung verliert.

Da die Förderung der Ozonforschung (einschließlich der UV-Forschung) aufgrund ihrer (nach Klärung der für die Politik maßgeblichen, seitens der Wissenschaft zu entscheidenden Fragen und Kontroversen) gesunkenen politischen Relevanz stark zurückgefahren wurde, spielen umfangreiche Forschungsprogramme jenseits laufender Monitoring-Programme eine deutlich geringere Rolle. Die verfügbaren Ressourcen dürften bei jährlich nunmehr deutlich unter 50 Mio. € liegen. Die Zahl der Ozonforscher dürfte sich gegenüber den 1990er Jahren etwa halbiert haben, die primär in den (grundfinanzierten) Forschungsinstituten und Messstationen verankert sind, die Ozonforschung als einen Forschungsschwerpunkt betreiben.

Ein beträchtlicher Teil der Ozonforscher scheint in die Klimaforschung gewandert zu sein, wofür sowohl nunmehr fehlende Finanzierung der Ozonforschung, ihre verringerte wissenschaftliche Reputationsträchtigkeit als auch das zunehmende Aufgehen einer partiell existierenden Specialty der Ozonforschung in der umfassenderen der Atmosphärenforschung⁴⁴ verantwortlich sein dürften.

Allerdings trifft diese Beobachtung insofern nur eingeschränkt zu, als es sich häufig um den generell zu beobachtenden Wechsel von Forschungsthemen derselben Arbeitsgruppen z.B. in Klimamodellierung oder -messnetzen handelt, wenn ein Forschungsthema wissenschaftlich oder förderpolitisch begründet gegenüber einem neuen an Interesse verliert.

Mit nachlassendem externen (politischen) Steuerungsinteresse weist eine zum einen problemorientierte, zum andern zugleich grundlagenorientierte Ozonforschung verstärkt die Kennzeichen einer reputationsgesteuerten⁴⁵, aber faktisch auch an Mertons Normen wissenschaftlicher Forschung⁴⁶ orientierten, gegenüber direkten externen Steuerungsversuchen resistenten (finalisierten) Forschung auf, insofern ihr Erkenntnisinteresse dem grundlegenden und zugleich detailgenauen Verständnis des Ozonhaushalts und den Aussichten einer Regeneration der Ozonschicht gilt.⁴⁷

44 Dies ist durchaus auch theoretisch begründet, insofern inzwischen vor allem Kopplungsphänomene im Vordergrund theoretischer und empirischer Ozonforschung stehen.

45 vgl. Luhmann 1968, 1990

46 Nach Merton (1968:640ff) ist Wissenschaft möglich, „weil und sofern Wissenschaftler (1) ihre Ergebnisse als von Zeit, Ort und Person der Entdeckung unabhängig ansehen (*Universalismus*), (2) das erzeugte Wissen als prinzipiell jedem zugänglich ansehen (*Kommunismus*), (3) gegenüber dem möglichen Resultat ihrer Forschung unvoreingenommen sind (*Uneigennützigkeit, disinterestedness*) und (4) ihre Arbeit der Prüfung durch andere aussetzen und im Licht neuer Erkenntnis korrigieren (*organisierter Skeptizismus*).“ (Daele/Krohn 1975:227) Daele/Krohn (1975) leiten die trotz begründeter (soziologischer) Kritik an ihrer Geltung bestehende begrenzte Wirksamkeit dieser Normen aus den Imperativen eines technisch-experimentellen Wahrheitsbegriffs ab.

47 Denn eine „reife“ Theorie kann in einige spezifische Phänomenbereiche hinein entwickelt oder als Grundlage sich entwickelnder Spezifitäten ausgenutzt werden. Dabei sind Gegenstands- und Lösungsbereich im Falle einer in dieser Hinsicht finalisierten Theorie zwar (extern) vorgegeben, nicht aber ihre Struktur, also etwa die Definition der wissenschaftlichen Objekte, die Methoden, die Erklärung der Gesetze und die empirische Reichweite, wobei die Tragweite dieser Resistenz aber eingeschränkt ist. (Daele/Krohn 1975:240f)

Kennzeichnend für die Ozonforschung sind somit:

- ein über 170 Jahre mehr oder minder durchgängig starkes Interesse der für sie zuständigen wissenschaftlichen Fachgebiete (physikalische und atmosphärische Chemie, Meteorologie, Atmosphärenphysik),
- einige ihre Stoßrichtung, Glaubwürdigkeit, wissenschaftliche und gesellschaftliche Relevanz prägende Forscherpersönlichkeiten (z.B. Schönbein, Dobson, Chapman; Cicerone, Crutzen, Molina, Rowland, Stolarski; Farman, Watson, Albritton, Brasseur, Solomon),
- frühzeitige Bemühungen um koordinierte, aufeinander abgestimmte Forschungs- und Messaktivitäten (Messnetzwerke, Laborexperimente, Modellierung),
- zunehmend komplexer, differenzierter und detaillierter werdende wissenschaftliche Beschreibungen und Erklärungen,
- die durch sie (mit) angestoßene Entwicklung zunehmend aufwändigerer Messplattformen und -instrumente,
- eine stark durch messtechnische, wirtschaftliche, umwelt- und gesundheitspolitische Interessen geprägte Definition von Forschungsthemen und -stoßrichtung,
- hierbei die zentrale Rolle des durch industrielle Produktion und Nutzung einer Stoffgruppe (FCKWs) verursachten und mit signifikanten globalen Folgeproblemen belasteten, sozial definierten Ozonproblems, verbunden mit einer dominanten Stellung der stratosphärischen Ozonforschung (bei anfänglicher Vernachlässigung der UV-Forschung),
- damit (insbesondere von 1974 bis 1986) verbundene wissenschaftsinterne und -externe Kontroversen um die Stringenz und hinreichende Akzeptabilität (konkurrierender) wissenschaftlicher Befunde, Erklärungen und Schlussfolgerungen, deren Schließung mehrfach mit aufwändigen Forschungs- und Messkampagnen verbunden war und wissenschaftsintern auf der Grundlage eindeutiger Befunde geleistet wurde,
- die diskursive Kopplung mit anderen Forschungsfeldern (insbesondere FCKW-Substitute, gesundheitliche und ökologische Effekte von Smog und UV-Strahlung), mit Regulierungsmaßnahmen und -verträgen und mit der Veränderung industrieller Produktions- und Verarbeitungsprozesse,
- die dadurch ausgelöste Förderung und Durchführung umfangreicher Forschungsprogramme mithilfe beträchtlicher zusätzlicher Forschungsressourcen⁴⁸,
- damit gekoppelt Notwendigkeit, Entwicklung, Finanzierung und Einsatz tendenziell kostenaufwändiger Messverfahren,
- eine in Theoriebildung, Methodenentwicklung, den Ergebnissen empirischer Untersuchungen, der Ausarbeitung von Modellen, der Schließung von Kontroversen und der Veröffentlichung von Forschungsergebnissen trotz teils an bestimmten Forschungsergebnissen interessierter Auftraggeber letztlich weitgehend wissenschaftsintern gestaltete Entwicklung,
- der hohe Stellenwert von laufenden intensiven (Peer) Review-Prozessen
- und ab etwa 1985 die autoritative Rolle von scientific Assessments hinsichtlich in Politik und Wirtschaft handlungsleitender wissenschaftlicher Befunde.

Hinsichtlich ihrer disziplinären Verankerungen handelt es sich bei der (stratosphärischen) Ozonforschung um die kombinierte Nutzung von (überwiegend kausalen) Theorien aus

48 Die FCKW-Hersteller (Weltmarkt in den 1980er Jahren: 2 Mrd. \$) investierten auch einige Mittel in (interessengeleitete) Ozonforschung, jedoch den größten Teil ihrer auf FCKWs bezogenen Forschungsmittel in die Entwicklung von Substituten.

- Photophysik und Photochemie (inklusive ihrer Kopplung), einschließlich der Messung und Erklärung von bei bestimmten Wellenlängen absorbiertes und anderen (größeren) Wellenlängen wieder emittierter Strahlung sowie der sich hieraus ergebenden Energiebilanz und strahlungsbedingten Erwärmung;
- physikalischer Chemie, die chemische Zusammensetzung, Reaktionsmuster und -raten der an den atmosphärischen Prozessen beteiligten Stofffamilien/Elemente beschreibt und erklärt;
- Mikrophysik, die die lokale (mikroskopische) Dynamik aller physikalisch-chemischen Vorgänge, insbesondere bei und an Aerosolen beschreibt;
- Strömungsphysik und Thermodynamik, die die atmosphärische Dynamik und Zirkulation erklären, teils beschrieben durch atmosphärische Wellen und durch Makroaustauschprozesse zwischen (synoptischen) Bereichen der Atmosphäre, wobei sie diese an anderer Stelle beeinflussende Prozesse, z.B. die Anreicherung von Treibhausgasen in der Troposphäre, berücksichtigen;
- angewandte Mathematik, Informatik und Kybernetik, die zunächst die aus diesen unterschiedlichen (physikalischen und chemischen) Prozessen jeweils resultierenden (atmosphärischen) Entwicklungsdynamiken abbilden⁴⁹ und darüber hinaus wirksame (nichtlineare) Wechselwirkungen zwischen diesen verschiedenartigen Prozessen sowie allgemeine, im Prinzip relevante Interaktionsdynamiken formal rekonstruieren und modellieren.

Gesamtergebnis dieser Theorien ist im Prinzip ein komplexes (kybernetisches) Prozessbild mit resultierender Ozonkonzentration(sveränderung), Temperatur, Druck etc.⁵⁰

Zusammenfassend sind an disziplinären Verankerungen theoretischer Erklärungen in der (stratosphärischen) Ozonforschung nach der bisherigen Analyse auf Makroebene Physik, Chemie und Mathematik zu nennen und auf subdisziplinärer Messebene Strömungsphysik, Thermodynamik, Mikrophysik, Strahlungsphysik, physikalische Chemie, Photochemie, angewandte Analysis und über Modellsimulationen auch Informatik anzuführen. Dabei stellen Meteorologie, Atmosphärenphysik und atmosphärische Chemie die sozialorganisatorisch verwandten und daher nahe beieinander liegenden fachlichen Orte dar, an denen die Nutzung dieser Theorien in der Forschung stattfindet.

In der Entwicklung der Ozonforschung lassen sich nun *cum grano salis* zwei unterschiedliche Dynamiken ausmachen, die grob ihre ersten drei bis ca. 1965 währenden und ihre letzten drei danach beginnenden Phasen abdecken.

Die erste Entwicklungsdynamik ist gekennzeichnet durch die Kombination von akademisch geprägtem wissenschaftlichen Erkenntnisinteresse an atmosphärischem Gehalt, Struktur und Nachweismethoden von Ozon und an (quantitativer) theoretischer Beschreibung des stratosphärischen Ozonhaushalts, von frühzeitig international koordinierten Netzwerken von Ozon-Messstationen und darüber hinaus von heterogenen problembezogenen Forschungsschwerpunkten (stratosphärisches Ozon und UV-Strahlung, bodennahes Ozon und Smog, industrielle Nutzung von Ozon). Die partielle Verbindung von wissenschaftlichen und wirtschaftlichen oder umweltpolitischen Interessen förderte die relativ professionelle Organisation der Ozonforschung, die Entwicklung von Messverfahren, die Einrichtung von Messnetzen, die systematische Erhebung von Ozonwerten und

49 In diesem Fall gehen die jeweils nicht modellierten Prozesse als extern vorgegebene Randbedingungen in Form von Parametrisierungen ein.

50 In diesem Zusammenhang hängt die Möglichkeit und Richtigkeit umfangreicher gekoppelter Modellsimulationen entscheidend von der verfügbaren Rechnerkapazität ab. Je besser der Computer, umso besser ist die Dynamik modellierbar und umso eher können neue, als wichtig erkannte Prozesse zusätzlich berücksichtigt werden.

schließlich die Bildung erster Grenzorganisationen wie der IOC. Auf kognitiver Ebene herrschte eine eher kumulative (gradlinige) Entwicklung ozonbezogener Theorien vor, bei der es in der 3. Phase um die Ergänzung und Modifizierung von Chapmans photochemischer Theorie durch dynamische Komponenten und – ab den 1950er Jahren – durch die Identifikation ozonabbauender Spurengase ging.

Die zweite Entwicklungsdynamik ist geprägt durch eine eindeutig problemorientierte Ozonforschung, die sich mit dem Nachweis, der auf katalytischen Zyklen basierenden Erklärung und der zukünftigen Entwicklung des durch anthropogene FCKW-Emissionen verursachten stratosphärischen Ozonabbaus befasste, deren wissenschaftliche Kontroversen in gesellschaftspolitische eingebettet waren, und deren Schließung mittels besserer Messungen, verbesserter Messverfahren und Schlüsselexperimente umfangreicher Forschungsprogramme und -kampagnen bedurfte. Über die in diesem Kontext bewusst etablierten Grenzorganisationen, Assessments und Monitoring-Programme wurde die Ozonforschung mit anderen für das Ozonproblem relevanten Forschungsgebieten verknüpft und praktische in wissenschaftliche und technische Probleme sowie umgekehrt wissenschaftliche und technische in praktische Problemlösungen übersetzt. Damit bildete sich eine wissenschaftliche Entwicklungsdynamik heraus, die über mehr als 20 Jahre von heftigen Kontroversen, überraschenden Entdeckungen (des Ozonlochs), aber auch klaren wissenschaftlichen Ergebnissen geprägt war. Letztere führten dann auf der Basis entsprechender Assessments mit der Durchsetzung des internationalen Ozonregimes nach 2000 ungefähr zur Halbierung des Umfangs der Ozonforschung mit der Folge einer nunmehr deutlich begrenzten Wissenschaftsdynamik.

Diese Entwicklungsdynamik basierte auf dem positiven, sich wechselseitig verstärkenden Zusammenspiel der verschiedenen, auf unterschiedlichen Ebenen angesiedelten Einflussfaktoren, wie eine expandierende Forschungsförderung, eine öffentliche Ozondebatte, das inner- und außerwissenschaftliche Interesse an der eindeutigen Klärung (kontroverser) auf den stratosphärischen Ozonhaushalt bezogener Hypothesen, die im Drei- bis Vierjahresrhythmus erstellten Ozon-Assessments (WMO 1986, 1989, 1992, 1995, 1999, 2003, 2007), die Etablierung und Ausweitung des internationalen Ozonregimes. So wären ohne die Finanzierung und Entwicklung entsprechender Messplattformen und Messinstrumente z.B. weder Aufbau und Zusammensetzung der Atmosphäre zu identifizieren und die Richtigkeit entsprechender Modelle nachzuweisen gewesen, noch wären der Nachweis von FCKWs in der Stratosphäre, die Entdeckung des Ozonlochs und der Beweis seiner vor allem durch den katalytischen Chlor-Dimer-Zyklus verursachten Entstehung möglich gewesen. Und ohne das Interesse von Politikern an unzweideutigen wissenschaftlichen Befunden in konfliktbeladenen, weiterreichende Aktionen und Regulierungen erfordernden Entscheidungslagen wären insbesondere die (zusätzlichen) umfangreichen, beträchtliche Forschungsmittel verschlingenden, auf die Klärung politisch als wichtig erachteter Forschungsfragen abzielenden Programme der Ozonforschung kaum zustande gekommen.

Schließlich wären ohne das kooperative Zusammenwirken vieler Forschungs- und Messinstitutionen, unterschiedlicher Analyseformen (theoretische Erklärung, Laborexperimente, bodengestützte, satellitengestützte und In-situ-Feldmessungen, Modellierung) und verschiedener Disziplinen (im Wesentlichen Teilgebiete von Physik, Chemie, Mathematik und Meteorologie) insbesondere die in der letzten Dekade(n) entwickelten, komplexeren, systemisch angelegten Erklärungen des Ozonhaushalts nicht möglich gewesen.⁵¹

51 „Recently, such experiments have begun to integrate physics, chemistry, and dynamics along with data from satellite observations, aircraft, and surface platforms. Only in this way is it possible to begin to grasp the complexity at which atmospheric processes unfold.” (Crutzen/Ramanathan 2000: 304)

Im Hinblick auf die in Kapitel 5 erörterte Rolle von (wissenschaftlichen) Kontroversen bei der Entwicklung von problemorientierten Forschungsgebieten seien abschließend diejenigen Kontroversen skizziert, die für die jeweiligen Phasen der Ozonforschung relevante Dispute und unterschiedliche Maße ihrer gesellschaftspolitischen Einbettung widerspiegeln. In den beiden Fällen weitgehend rein innerwissenschaftlicher Dispute (in der 3. und 6. Phase) ist ihre Kennzeichnung als Kontroverse allerdings problematisch, da diese von den Beteiligten weniger als eine solche, sondern mehr als aufzuklärende Fragen und Konsistenzproblem wahrgenommen wurden oder werden.

In der 3. Phase stand ab den 1940er Jahren die Modifizierung der photochemischen Theorie Chapmans durch dynamische Komponenten im Vordergrund, um die jahreszeitliche und meridionale Verteilung des Ozons korrekt wiederzugeben. Im Wesentlichen handelte es sich um eine rein wissenschaftliche Kontroverse über grundlegende Determinanten der Ozonbilanz, in der anthropogene Einflüsse keine Rolle spielten und nur die Relevanz der stratosphärischen Ozonschicht für die Absorption der UV-B Strahlung bekannt war. Chapmans Theorie war grundsätzlich akzeptiert, da sie diverse Beobachtungen und Phänomene einfach zu erklären vermochte.

Aufgrund genauerer Messmöglichkeiten wurde darüber hinaus aber ab den 1950er Jahren klar und war auch nicht kontrovers, dass es ozonabbauende Spurengase geben musste, die für die nunmehr genauer gemessenen, weit geringeren als von Chapmans Theorie postulierten Ozonwerte verantwortlich waren. – Prinzipiell hätten wie gesagt auch zukünftige anthropogene Einflüsse durch die 1930 einsetzende FCKW-Nutzung theoretisch bereits berücksichtigt werden können, aber hierfür gab es zum damaligen Zeitpunkt weder theoretischen noch empirischen Anlass (vgl. Bösch 2000).

Was die in den 1970er und teils 1980er Jahren stattfindende Kontroverse(n) um die Rolle von FCKWs im stratosphärischen Ozonhaushalt anbetrifft, so war deren Relevanz – neben den vested interests der betroffenen industriellen und politischen Akteure – entscheidend begründet in unzureichendem Wissen und fehlenden Daten über FCKW-Emissionen, natürliche Chlorquellen, troposphärische Abbauprozesse, atmosphärische Lebensdauern, stratosphärische Konzentrationen von wichtigen Spurengasen, Reaktionsraten oder Chlorgasreservoirs, und in damit zusammenhängenden Messwertdifferenzen, Messproblemen, Messanomalien und Modelldefiziten (vgl. Parson 2003), die keine eindeutige Klärung der tatsächlichen Bedeutung des FCKW-Transports in die Stratosphäre und des chlorinduzierten Ozonabbaus und daher die durchaus vertretbare Einnahme konträrer Positionen erlaubten. So mussten z.B. im Verlauf dieser Kontroverse erst die Bedeutungslosigkeit natürlicher Chlorquellen für anfangs noch nicht nachgewiesene größere Chlorgehalte in der Stratosphäre empirisch und theoretisch nachgewiesen werden; bis 1985 gab es weder Simultanmessungen noch Messwerte kritischer Substanzen wie ClONO_2 oder HOCl ; die seitens der Statistiker mit aus ihrer Sicht guten Gründen untergewichteten Winterdaten der Messstation in Arosa/Schweiz mussten separat betrachtet werden, um 1985 erste deutliche Hinweise eines Trends abnehmenden stratosphärischen Ozongehalts klar zu erkennen (vgl. Grundmann 1999:149ff).

Ab 1970 gab es theoretische Konzepte, die katalytische Abbauzyklen des Ozons mit Blick auf anthropogene Quellen der Katalysatoren, einschließlich der vermutlichen Relevanz der sich später als entscheidend herausstellenden heterogenen Reaktionen, theoretisch postulierten⁵², die später als in der Stratosphäre tatsächlich in signifikantem Ausmaß stattfindend nachgewiesen wurden. Ihr empirischer Nachweis benötigte jedoch in vielerlei Hinsicht noch unbekanntes und zugleich valide Messdaten, die mithilfe verbesserter Messverfahren (seit 1978 einschließlich systematischer Satellitenmessungen) und besseren Modellen (steigende Rechnerkapazitäten) nur allmählich akkumu-

52 Einen katalytischen Ozonabbau durch Wasserstoffradikale beschrieben Bates und Nicolet bereits 1950.

liert wurden, und vielfach auch 1985 noch nicht verfügbar waren. Aufgrund der vested interests, die mit den im Vordergrund stehenden anthropogenen Quellen – und ihren erstmalig konkret debattierten globalen Effekten – verbunden waren, wurden die experimentellen, datenmäßigen, theoretischen und methodischen Defizite empirischer Nachweise von den Gegenpositionen systematisch hervorgehoben und auf verschiedenen theoretischen Ebenen (Quellen, Transport, Wirksamkeit etc.) mit Gegenerklärungen konfrontiert, die auf die Irrelevanz anthropogener Einflüsse abzielten. Hier schlug die gesellschaftspolitische Einbettung der wissenschaftlichen Kontroverse durch, die sich an allen Schwachstellen entzündete und nicht auf ein entscheidendes Experiment fokussieren ließ. Vielmehr spielten neben der allmählichen Akkumulation von atmosphärischen Messdaten und von chemischen Reaktionsdaten aus Laborexperimenten sowie theoretischen Fortschritten der Analyse katalytischer Abbauzyklen eher messtechnische Standardisierungen die entscheidende Rolle bei der Schließung der Kontroverse (vgl. Grundmann 1999:145ff, WMO 1998).⁵³

Diese erfolgte letztlich erst nach der Klärung des Ozonlochs, das als gänzlich unerwartetes Ereignis die bereits die Hegemonie zu erringen beginnende Theorie von Molina/Rowland (1974) zu nächst noch einmal in Frage stellte.

In der die 5. Phase kennzeichnenden, in der zweiten Hälfte der 1980er Jahre angesiedelten Kontroverse ging es um die Erklärung des antarktischen Ozonlochs.⁵⁴ Da das Ozonloch wissenschaftlich nicht erwartet worden war und da hier anthropogene Einflüsse besonders drastisch und plakativ deutlich wurden und damit die gesellschaftspolitische Dimension seiner Erklärung theoretisch und praktisch sozial relevant war, und da sowohl viele empirische Kontextdaten als auch geeignete Messmöglichkeiten relativ rasch verfügbar waren, konnte diese in der Sache selbst primär wissenschaftliche Kontroverse (Erklärung des akzeptierten Ozonlochs) rasch aufgelöst werden, indem kontroverse, erst 1985/86 formulierte Hypothesen durch entscheidende Messungen bis 1987/88 belegt oder verworfen wurden. Dabei wurde zugleich das notwendige Zusammenspiel von Chemie und Dynamik in der Folge insbesondere an anderen Orten deutlich, sodass es nicht nur um die Hegemonie einer theoretischen Erklärung, sondern um komplexere Erklärungsmuster ging, die sich weniger für einfache Zuspitzungen eignen. Damit griffen (in der Wissenschaft) zunehmend solche Untersuchungen Platz, die grundsätzlich akzeptierte Erklärungsmuster substantiierten und erweiterten, und diese nicht mehr als im Kern zutreffend zu beweisen oder zu widerlegen suchten. Die Schließung der Kontroverse geschah maßgeblich durch entscheidende Experimente und Messungen, Theorieentwicklung und verbesserte Messverfahren, Forschungsprogramme und Kampagnen. Die gesellschaftspolitische Einbettung schlug sich in der Finanzierung extensiver Ozonforschungsprogramme und Messreihen nieder, während zugleich sozial als autoritativ anerkannte WMO-Assessments methodisch unzulässige Vermischungen unterschiedlicher Argumentationsebenen und -interessen begrenzten und mit der grundsätzlichen Anerkennung von die Ozonschicht bedrohenden anthropogenen Emissionen gesellschaftspolitisch die Umsetzung eines internationalen Regimes zu deren Begrenzung in den Vordergrund trat.

In der 6. Phase kann nur sehr eingeschränkt von Kontroversen gesprochen werden, insofern ungeklärte Fragen und divergierende Erklärungen primär als Forschungsprobleme angesehen wer-

53 „The negotiation on the equivalence of non-equivalent situations is always what characterizes the spread of science, and what explains, most of the time, why there are so many laboratories involved every time a difficult negotiation has to be settled.“ (Latour 1983:155) In den USA wurden 1980 ca. 6 Prozent des Bruttosozialprodukts für Standardisierung ausgegeben, dreimal so viel wie für Forschung und Entwicklung (Hunter 1980).

54 „Die etablierten Atmosphärenwissenschaften des Jahres 1985 waren trotz ihrer schon relativ umfassenden Komplexität nicht in der Lage, den rasanten Ozonabbau im Frühjahr in der unteren antarktischen Stratosphäre zu erklären. Geschweige denn wären sie vorher in der Lage gewesen, die Entwicklung in der Antarktis zu prognostizieren.“ (BMBF 2000:21)

den, an deren Lösung ein gemeinsames wissenschaftliches Interesse besteht. Kontrovers ist meist lediglich das theoretisch postulierte, aber experimentell noch nicht gemessene quantitative Maß des interessierenden Phänomens. Außerdem haben Wissenschaftler, die spezifische theoretische Erklärungen oder bestimmte Phänomene als für den Ozonhaushalt wesentlich propagieren, auch ein (auf Reputationsgewinn abzielendes) Interesse, ebendiese gegenüber konkurrierenden Theorien und Phänomenbereichen im wissenschaftlichen Diskurs als bedeutsamer durchzusetzen. In diesem Sinne kann dann noch von Kontroversen gesprochen werden.

So werden beispielsweise der Einfluss des Solarzyklus in der Thermosphäre mit dem Transport dort photochemisch erzeugter NO_x -Moleküle in die Stratosphäre, oder Ausmaß und Mechanismen des Transports von Wasserdampf durch die Tropopause, oder allgemein Troposphäre-Stratosphäre-Interaktionen, oder Ozon-Klima-Wechselwirkungen – bei signifikanter gesellschaftspolitischer Einbettung anthropogen verursachter Klimaveränderungen – im Wesentlichen als wissenschaftsintern zu klärende offene Forschungsfragen (von normal science) angesehen, die allerdings beträchtliche, öffentlich zu finanzierende Forschungsressourcen benötigen. Sie werden von den (wissenschaftlichen) Akteuren nicht mehr als brisante Kontroverse angesehen, weil es sich (1) bislang nicht um gesellschaftspolitisch bedeutsame (neue) grundlegende Fragen handelt, weil (2) diese auch wissenschaftsintern als zwar interessante, aber als in ihrer Bedeutung und konkreten Form einfach nur aufzuklärende Fragen einzuordnen sind, wobei (3) Theorieformulierung, Modellierung und Messung/ Messdatenauswertung zeitlich Hand in Hand gehen, sodass grundsätzliche Überraschungen oder Infragestellungen dominanter theoretischer Erklärungen nicht zu erwarten sind.

Insgesamt ergibt sich für diese 4 Phasen der Ozonforschung, in denen jeweils eine deutliche naturwissenschaftliche Erklärungsbasis vorhanden ist, ungefähr das folgende in Tabelle 1 wiedergegebene Tableau der Kennzeichen von in ihnen relevanten Kontroversen. Sie unterscheiden sich signifikant in ihrer gesellschaftspolitischen Einbettung und ihrer inner- wie außerwissenschaftlichen Brisanz. Gemeinsamkeiten bestehen – den normativen Vorgaben wissenschaftlicher Geltung entsprechend – in ihrer Auflösung durch die Überprüfung von (bestehenden oder neu entwickelten) Theorien mithilfe methodisch hinreichend abgesicherter empirischer Messergebnisse, einschließlich der ihnen entsprechenden Modifizierung und Erweiterung relativ gut bestätigter Theorien. Somit entsprechen Verlauf und Schließung dieser Kontroversen im Wesentlichen dem, was aus wissenschaftstheoretischer und wissenschaftssoziologischer Perspektive ungefähr zu erwarten gewesen wäre.

Tab. 3.1: Kennzeichen maßgeblicher wissenschaftlicher Kontroversen in den verschiedenen Phasen der Ozonforschung

Kennzeichen \ Phase	3.Phase: 1930-1965	4. Phase:1965-1985	5. Phase: 1985-2000	6. Phase: ab 2000
geklärte Grundlagen	photochemische Theorie der atmosphärischen Ozonverteilung	Existenz katalytischer Abbauzyklen von Ozon, Grundmuster atmosphärischer Zirkulation	Existenz heterogener Reaktionen, Zusammenwirken chemischer und dynamischer Prozesse	gekoppelte chemische, dynamische, photochemische, mikrophysikalische Erklärungsmodelle
ungeklärte, die Kontroverse auslösende Kernfragen	abweichende saisonale und meridionale Ozonverteilung	anthropogen verursachte Änderungen des Ozonhaushalts	Entstehung des antarktischen Ozonlochs	Ausmaß und Struktur von zusätzlichen Einflüssen und von Wechselwirkungen
Grundstruktur des Dissenses	unzutreffende theoretische Werte	konkurrierende Erklärungsmodelle, fehlende empirische Daten in Bezug auf die Frage: Gibt es Ozonabbau und ist er anthropogen (durch FCKWs) verursacht?	konkurrierende theoretische Erklärungen	Unkenntnis und konkurrierende Erklärungsmodelle
Lösung	Verbindung von Photochemie und Dynamik	empirischer Nachweis der theoretischen Postulate, Theorieverfeinerung	empirischer Nachweis der chemischen Hypothese, Theorieverknüpfung und -erweiterung, Mikrophysik	verfeinerte Theorieverknüpfung, komplexere und differenziertere, gekoppelte Modelle
Schließungsmodus	verbesserte Messverfahren, Messungen, Theoriemodifikation und -kombination	Messungen, Standardisierung, Peer Review	Entscheidende Experimente und Messungen, verbesserte Messverfahren, Forschungsprogramme und Kampagnen	Messkampagnen, Modellierung, Standardisierung, Kooperation
gesellschafts-politische Relevanz	niedrig	hoch	hoch	mittel, wegen benötigter Forschungsmittel
substanziell prägende nichtwissenschaftliche Einflüsse	nein	ja	nein	nein
innerwissenschaftliche Brisanz	ja, da theoretische Grundlagen betreffend	ja, da neue chemische Prozesse und qua Kontroverse stark verbessertes Verständnis der Atmosphäre	ja, da theoretisch nicht erwartetes Phänomen	nein, da normal science mit ergänzenden theoretischen und empirischen Erklärungen
außerwissenschaftliche Brisanz	nein	ja	ja, begrenzt qua befürchtetem arktischem Ozonloch	nein

4 Klimaforschung

Klima lässt sich mit Brasseur et al. (1999:515) als das langfristige statistische Verhalten der Atmosphäre⁵⁵, darüber hinaus aber auch der Hydrosphäre und der Kryosphäre und somit aller bodennahen Medien der Erde definieren. Klima ist das Wetter, das wir aufgrund von mithilfe statistischer Verfahren über zumeist (von der WMO als Klima-Normalperiode definierte) 30 Jahre gemittelten Klimaparametern wie Temperatur, Druck, Wind, Luftfeuchte, Sonnenstrahlung an einem bestimmten Ort erwarten.⁵⁶ Dabei kann nicht nur das Wetter, sondern auch das Klima auf Zeitskalen von Wochen bis zu Jahrtausenden schwanken aufgrund externer Anregungsmechanismen wie Sonneneinstrahlung, Vulkaneruptionen, Kontinentalverschiebungen, und interner Wechselwirkungen im Klimasystem. „Dieses System bilden Atmosphäre, Ozeane, Eis und Landoberflächen einschließlich der im Meer und auf den Kontinenten lebenden Pflanzen und Tiere.“ (Lemke 2002:162)

Klimaforschung bezeichnet dann die wissenschaftliche Untersuchung von Klima-(phänomenen), die auf deren systematische Beschreibung und Erklärung abzielt, gegebenenfalls einschließlich deren externer Ursachen und – als Klimafolgenforschung – deren externer Auswirkungen. Auch wenn der anthropogene Einfluss auf das Klima aufgrund seiner Signifikanz inzwischen vielfach im Untersuchungsfokus der Klimaforschung steht, handelt es sich dabei zunächst einmal um genuin naturwissenschaftliche Forschung.⁵⁷

Als Klimawissenschaft lässt sich dann (innerhalb des Funktionssystems der Wissenschaft) dasjenige soziale Teilsystem bezeichnen, das in organisierter Form (aufgrund wissenschaftsinterner und -externer Nachfrage) Klimaforschung durchführt (Entstehungszusammenhang), für die Prüfung und Anerkennung ihrer Ergebnisse und der sie erklärenden Theorien als „wahr“ zuständig ist (Geltungszusammenhang) und diese auch nach außen vertritt und in gesellschaftliche Kontexte (nutzbringend) einbringt (Verwendungszusammenhang). Gegenüber der Klimatologie als Teildisziplin der Meteorologie⁵⁸ wird Klimawissenschaft als sich potenziell neu herausbildendes Fach oder Disziplin weiter und umfassender eingestuft, insofern sie als mögliche Erdsystemwissenschaft (earth (system) science) sämtliche Bereiche der Klimaforschung wie z.B. Glaziologie oder die (klimatisch bedeutsamen) Wechselwirkungen zwischen Biosphäre und Atmosphäre oder Hydrosphäre umfasst.⁵⁹

55 „Das globale Klima resultiert aus der geographischen Verteilung umgesetzter solarer Strahlungsenergie und deren Umverteilung durch Winde und Meeresströmungen. Unter Klima verstehen wir dabei die Verhältnisse in der bodennahen Luftschicht, die der Mensch, die Pflanzen- und Tierwelt als unmittelbare Umwelt erleben. Es hat weltweit eine enorme räumliche und zeitliche Variabilität.“ (Fabian 2002:67)

56 Insofern erfahren wir das Klima als langfristige, meist stabile charakteristische Eigenschaft einer Region, gewissermaßen als langjährigen Durchschnitt des Wetters.

57 Pointiert ausgedrückt vermag die Klimatheorie z.B. voraussichtliche Klimaveränderungen bei einer Verdopplung des CO₂-Gehalts der Atmosphäre abzuschätzen, wobei es – bei gleichartigen Einträgen – keinen Unterschied macht, ob dieser anthropogenen oder (fiktiv) natürlichen Ursprungs ist.

58 „Die Klimatologie befasst sich auf der Basis täglicher Klimabeobachtungen mit der Berechnung der mittleren atmosphärischen Verhältnisse. Als weiterführende Aufgabe hat sie die jahrzehnte- bis jahrhundertelangen Messreihen, z.B. von Temperatur und Niederschlag, auf Schwankungen und Klimaänderungen zu untersuchen sowie die statistischen Eigenarten der globalen atmosphärischen Zirkulation darzustellen und unter Berücksichtigung dynamischer, thermischer und chemischer Prozesse vorauszuberechnen.“ (Malberg 1994:3)

59 Dabei handelt es sich hier um eine bloß terminologische Abgrenzung, insofern sich eine Klimawissenschaft durchaus auch als erweiterte Klimatologie einordnen ließe, wie etwa das Feld der Paläoklimatologie indiziert.

Die historische Entwicklung und Ausdifferenzierung der Klimaforschung lässt sich in sechs unterschiedliche Entwicklungsniveaus markierende Phasen unterteilen:⁶⁰

1. Rudimentäre Genese einer wissenschaftlichen Klimaforschung (~1800 - ~1900)
2. Erste globale naturwissenschaftliche Klimatheorien und Hypothesen anthropogen verursachten Klimawandels (~1900 - ~1950)
3. Aufschwung der Klimaforschung als Nischenelement einer verstärkten meteorologischen (Wetter-)Forschung (~1950 - ~1970)
4. Herausbildung einer eigenständigen multidisziplinären, auf potenziell anthropogen verursachten Klimawandel fokussierenden Klimaforschung (~1970 - ~1988)
5. Politischer Durchbruch und sozial-organisatorische Verankerung der Klimaforschung bei wissenschaftlichem Nachweis von und Konsens über anthropogen verursachten Klimawandel (~1988 - ~2000)
6. Kognitive Ausweitung und Validierung sowie Förderbegrenzung der Klimaforschung (ab ~2000).

Nachfolgend werden – wie bei der Ozonforschung – die die jeweiligen Phasen kennzeichnenden Forschungsaktivitäten, -programme, -institutionen und -ressourcen zusammenfassend dargestellt. Während es durchaus schon vor 1800 systematische Klimabeobachtungen und Erklärungsmodelle bis hin zu anthropogen verursachtem Klimawandel und die Entwicklung klima-relevanter Messgeräte gab⁶¹, kann – vor dem Hintergrund einer sich im Allgemeinen erst im 19. Jahrhundert in ihre Disziplinen ausdifferenzierenden und sozial etablierenden Wissenschaft (vgl. Cohen 1994, Gläser 2006, Guntau/Laitko 1987, Luhmann 1990, Stichweh 1984, 1992) – frühestens in diesem Zeitraum von einer überwiegend im Rahmen der Geografie regional ausgerichteten, phänomen- und problemorientierten Klimakunde gesprochen werden, die ihre Daten als Klimatologie innerhalb der sich als Fach herausbildenden Meteorologie in Form von deskriptiven quantitativen Messreihen der Wetterbeobachtung gewann und beschreibende Naturgeschichte durch systematische Darstellung von regionalen Klimata ablöste. Hierbei war sie entscheidend von verfügbaren, neu entwickelten Messinstrumenten und Wetterkarten abhängig. Dabei setzte sich im Zuge des sukzessiven Aufbaus meteorologischer Messstationen, denen Bemühungen um internationale Kooperation, Standardisierung und routinemäßigen Datenaustausch folgten, ein Verständnis von Klima als einer regional mehr oder minder konstanten stationären atmosphärischen Konstellation durch.⁶² Während es in der sich allmählich sozial und organisatorisch etablierenden, im Wesentlichen deskriptiv angelegten Klimatologie vorrangig um Datensammlung und langfristige Messreihen zum Zwecke der Bestimmung regionaler und lokaler Klimata ging, stammen die für die Klimaforschung maßgeblichen, zum Teil auf Laborexperimenten beruhenden Entdeckungen des 19. Jahrhunderts von Wissenschaftlern, für die klimarelevante Untersuchungen nur eine ihrer vielfältigen wissenschaftlichen

60 Wie bei der Ozonforschung werden mit dieser Phaseneinteilung weder die Eindeutigkeit ihrer Festlegung noch (jenseits relativ kontinuierlicher Entwicklung) Entwicklungsbrüche bei den Phasenübergängen behauptet.

61 Vor 1600 erfand Galilei das Thermoskop, einen Vorläufer des Thermometers, das Fahrenheit 1714 entwickelte. 1643 führte Torricelli den Luftdruck betreffende Experimente durch. 1686 zeigte Halley die Abhängigkeit der Sonneneinstrahlung von den Breitengraden und postulierte die daraus resultierende allgemeine Zirkulation der Atmosphäre. 1735 erkannte Hadley die Bedeutung der Erdrotation für die Passatwinde. In der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts wurden Kohlendioxid, Stickstoff und Sauerstoff und 1781 die quantitative Zusammensetzung der Luft aus den letzteren beiden Elementen identifiziert und gemessen (vgl. Crutzen/Ramanathan 2000).

62 Die systematische Erfassung und Beschreibung regionaler Klimata gewann auch im Kontext kolonialistischer Expansion an Bedeutung.

Interessen waren. Angesichts des (neuen) Wissens um die Existenz von Eiszeiten spielte die Diskussion um mögliche periodische Klimaänderungen und deren Folgen bis zur Jahrhundertwende eine wichtige Rolle, die durchaus signifikante Parallelen mit der heutigen Klimadiskussion aufweist. Generell wurden bereits im 19. Jahrhundert viele der heute erörterten und anerkannten Ursachen eines Klimawandels als wissenschaftlich begründete, jedoch noch kaum empirisch hinreichend abgesicherte Klimawandeltheorien vorgetragen.

Zu dieser Forschung konnten Einzel- und selbst Amateurwissenschaftler noch Wesentliches beitragen. Für die Messreihen und deren vergleichende Auswertung bedurfte es jedoch bereits organisierter Forschung, teils einschließlich internationaler Kooperation, aber noch keiner Großforschung. Von daher war der patchworkartige soziale Rahmen dieser Forschungsaktivitäten auf der einen Seite durch die nationale und partiell internationale (damals im Wesentlichen europäische) Wissenschaft auf Institutsebene und auf der anderen Seite durch die sich selbst gerade etablierenden, sie rahmenden Fächer Geografie und Meteorologie als auch die Wetterstationen markiert. Insofern die vielleicht 100 bis 200 an diesen Untersuchungen und Diskursen beteiligten Wissenschaftler sich keineswegs nur mit Klimafragen beschäftigten und die Anzahl genuiner Klimatologen noch sehr gering war, erscheint deren Einstufung als eigene Specialty allenfalls analytisch gerechtfertigt. Die für diese rudimentäre Klimaforschung verfügbaren Ressourcen entsprachen im Grundsatz der damals üblichen universitären Ausstattung bzw. anteilig denjenigen der neu eingerichteten Wetterstationen. In diesem Rahmen waren sie jedoch von beträchtlicher Höhe, wenn man die beachtliche Zahl von Untersuchungen und Messstationen bedenkt, und dürften wahrscheinlich eine Größenordnung von vielleicht 10 Mio. € jährlich erreicht haben. Verbunden mit dem Interesse an der systematischen Erhebung von meteorologischen Messdaten und an wissenschaftlicher Reputation war das primäre Erkenntnisinteresse einer über bloße Datensammlung hinausreichenden Klimakunde sowie am im Laufe der Erdgeschichte aufgetretenen Klimawandel wohl vor allem genuine wissenschaftliche Neugierde. Zugleich trugen außerwissenschaftliche Interessen erkennbar zur Förderung und thematischen Ausrichtung der Klimaforschung bei.

Während der zweiten Phase der Klimaforschung (~1900 - ~1950) standen in der Sache zum einen die Ausweitung einer auf regionale Klimata ausgerichteten, Klimaklassifikationssysteme entwickelnden Klimatologie im Vordergrund, die vor allem davon profitierte, dass sich die Meteorologie im Wissenschaftssystem als eigenständiges Fach in sozialer (Wetterstationen, universitäre Forschung und Lehre) und kognitiver Hinsicht (physikalische Grundgleichungen, numerische Wetterprognosen) substantiell etablierte und vor allem aufgrund militärischer Interessen an verbesserter Wetterbeobachtung und -vorhersage massiv gefördert wurde und Entwicklungsschübe verzeichnete. Zum anderen wurden insbesondere zur Erklärung der Eiszeiten unterschiedliche (physikalische) Theorien des Klimawandels vorgeschlagen und kontrovers diskutiert, ohne im Lichte der damaligen Datenlage (empirisch) zwingende Überzeugungskraft erlangen zu können und eine eigenständige Klimaforschung zu begründen. In diesem Kontext wurde die grundsätzliche Bedeutung von CO₂ für eine (globale) Temperaturerhöhung in einfachen Klimamodellen als auch der tatsächliche Anstieg der Oberflächentemperatur zwischen 1910 und 1940 aufgezeigt, die Hypothese eines diesbezüglich signifikanten anthropogenen Beitrags jedoch mit schlagkräftigen Argumenten zurückgewiesen. Die wissenschaftliche Untersuchung eines globalen Klimawandels blieb dabei selbst für die kleine Community der Klimatologen nachrangig und wurde zu keinem in der Meteorologie relevanten Forschungsthema. Entsprechend trug die sich verstärkende internationale Kooperation von Meteorologen und Geowissenschaftlern kaum zur Förderung der Klimaforschung bei, auch wenn in diesen Fächern für die Klimaforschung entscheidendes Basis- und Kontextwissen gewonnen wurde und Klimatologen infolge ihrer Datenkompilation aus verschiedensten Ländern neben ihrem regionalen Fokus sehr wohl vermehrt eine globale Perspektive einnahmen.

Typische Merkmale der ersten Phase trafen weiterhin zu, wie Klimaforschung als eine regional ausgerichtete, phänomen- und problemorientierte, auf handwerklichem Basiswissen und erklärenden Teilmodellen gründende Klimatologie, Abhängigkeit der Klimatologie von verfügbaren Messinstrumenten und -verfahren, verstärkte Bemühungen um Standardisierung, und eine sowohl auf weitgehend für sich arbeitenden Einzelwissenschaftlern basierende als auch organisierte, internationale Kooperation einschließende Forschung. Somit zeichnete sich der soziale Rahmen einer institutionell noch gar nicht ausdifferenzierten Klimaforschung im Wesentlichen aus durch Merkmale wie Erweiterung und Verdichtung von weiterhin grundsätzlich international, in der Tendenz akademisch geprägten, aber auch deutlich anwendungsorientierten geowissenschaftlichen Forschungsaktivitäten⁶³, die wachsende Rolle von Messplattformen und -instrumenten, von Wetterstationen und Messnetzen, und den Einsatz neu entwickelter numerischer Rechenhilfen und erster Rechenmaschinen. Hierbei wurden sowohl für das Verständnis des Klima(wandel)s wesentliche Phänomene entdeckt als auch maßgebliche (atmosphärenphysikalische und atmosphärenchemische) Theorien formuliert.

Wenn man der Klimaforschung nicht genuin zurechenbare meteorologische bzw. geowissenschaftliche Forschungsarbeiten und die (standardisierte) Erhebung von Wetterdaten außen vor lässt, dürfte das Äquivalent der von ihr verbrauchten Forschungsmittel während dieser Phase von vielleicht 10 Mio. € auf allenfalls 20 Mio. € angestiegen sein.

Soweit als eigenständiges identifizierbar, war das Erkenntnisinteresse der Klimaforschung zugleich akademischer, wissenschaftliche Reputation versprechender Natur, das sich auf die Systematisierung, Einordnung und theoriegeleitete Erklärung von Klimaphänomenen und -prozessen richtete, und praktischer (gesellschaftlicher) Natur, da es ihm auch um die praktische Nutzbarkeit ihrer Klassifikationen von Klimazonen und ihrer Erkenntnisse über Klimawandel, Klimaeinflüsse und mögliche Klimabeeinflussung ging, wobei außerwissenschaftliche, gerade auch militärische Interessen bei der Förderung und thematischen Ausrichtung der Wetter- und Klimaforschung zum Tragen kamen.

In der dritten Phase der Klimaforschung (~1950 - ~1970) entstanden komplexere und differenziertere Klimatheorien und -modelle, die sich über mehrere Bereiche und mehr Skalen erstreckten, wobei die Atmosphäre jedoch im Vordergrund stand. Dies ging einher mit und war nur möglich infolge der Entwicklung und Nutzung von Computern, Satelliten und neuen Messverfahren, wodurch u.a. Proxydaten gewonnen, erste gekoppelte Modelle entwickelt und auch kleinskalige Phänomene berücksichtigt werden konnten. Im Gefolge des IGY stiegen die verfügbaren (öffentlichen) Forschungsmittel für meteorologische, aber auch geologische und ozeanografische Forschung signifikant an und wurden der kontinuierliche Anstieg des atmosphärischen CO₂-Gehalts eindeutig nachgewiesen und außerdem die Relevanz anderer Treibhausgase näher betrachtet. Infolgedessen wurde vor dem Hintergrund des sukzessiven Durchbruchs des Umweltthemas in den 1960er Jahren der (auf CO₂-Emissionen beruhende) anthropogene Einfluss auf das (globale) Klima verstärkt (kontrovers) diskutiert und gelangte zunehmend ins Zentrum der Klimaforschung (vgl. Fleagle 1992).

Während mit der Verfügbarkeit und Nutzung von Computern die drei unterschiedlichen Traditionen der Meteorologie (empirische Wetterbeobachtung (Klimatologie), theoretische allgemeine Erklä-

63 Geowissenschaften werden hier vielfach in ihrem engeren Sinn gebraucht, um genuin mit der Lithosphäre (und dem Erdinneren) befasste Fächer wie Geologie, Geophysik, Erdbebenkunde und auch Geografie gegenüber die Atmosphäre oder die Hydrosphäre untersuchenden Fächern wie Atmosphärenwissenschaften, Meteorologie oder Ozeanografie abzusetzen, teils aber auch in ihrem weiteren Sinn verstanden, wonach ihnen alle Fächer zugehören, die sich mit einer der Sphären der Erde befassen.

nung atmosphärischer Phänomene und praktische Wettervorhersage; vgl. Nebeker 1995) zusammengeführt wurden, sodass sich die Meteorologie als wissenschaftliches, vor allem physikalisch basiertes Fach endgültig etablierte⁶⁴ und (routinemäßige) numerische, sukzessive verbesserte Wettervorhersagen Einzug in den Alltag hielten⁶⁵, lässt sich auf sozialer Ebene in dieser Phase gleichfalls in den 1960er Jahren die beginnende Ausdifferenzierung einer eigenständigen Klimaforschung (im heutigen Sinne) mit der Gründung entsprechender Institutionen und Forschungsprogramme ausmachen. Sie spielte jedoch vorerst weiterhin nur eine Nebenrolle⁶⁶ und nur die sie heute maßgeblich prägenden Fächer wie insbesondere Meteorologie sowie Ozeanografie, Gletscherkunde, Polarforschung, Geophysik, Geologie und Geografie standen im Zentrum von Förderpolitik und Forschungsausrichtung. Von vorrangigem Interesse waren vor allem Wetterforschung, -prognose und -beeinflussung. Die durch die Rahmenprogramme des IGY initiierten Errichtung, Ausbau und dauerhafte Unterhaltung von Forschungsstationen und Messkampagnen, die sich gerade auch einer systematischen Erfassung bisher vernachlässigter physikalischer und chemischer Variablen annahmen und auf eine Standardisierung und Verstetigung der massiv verdichteten Messnetze abzielten (Boch 2002:126f), führten jedoch zu vielen für die Klimaforschung relevanten Messdaten.⁶⁷ Immerhin schaffte es der Klimawandel in den USA bereits, nach ersten Warnrufen renommierter Wissenschaftler Ende der 1960er Jahre auf die politische Agenda zu gelangen.

Im Ergebnis fand genuine Klimaforschung in dieser Phase weitgehend im Rahmen von auf Atmosphärenforschung ausgerichteten sowie von anderweitigen geowissenschaftlichen Forschungsprogrammen und -projekten statt, wobei es sich jedoch zunehmend um Wissenschaftler handelte, die sich dauerhaft und vorrangig mit Klimafragen befassten, ob diese nun Klimamodellierung, Treibhausgasemissionen und -konzentrationen oder die Gewinnung von Proxydaten betrafen.⁶⁸ Dem-

64 1945 hatte die American Meteorological Society 2883 Mitglieder, 1955 waren es 5449 und 1975 8538, und die Zahl der meteorologischen Fachpublikationen verzehnfachte sich zwischen 1945 und 1985 zumindest (vgl. Nebeker 1995:173).

65 Für das damit einhergehende enorme Wachstum der Meteorologie waren die rapide Entwicklungsdynamik von Computern, die systematische Ausweitung von Messstationen und von durch (neu gegründete) internationale Organisationen koordinierten (globalen) Messnetzen, und der zunehmende Einsatz von unterschiedlichen, sich ergänzenden Messverfahren einschließlich Satelliten entscheidend.

66 Sowohl im Rahmen des IGY, dessen Programme der Atmosphärenforschung einen großen Stellenwert einräumten, als auch des Global Atmospheric Research Program (GARP) war das Klima lediglich ein Randthema (vgl. Boch 2002, Fleming 1998, Weart 2003, 2005).

67 Das WWW-Programm (World Weather Watch) „entwarf erstmals einen umfassenden Plan für ein boden- und raumgestütztes Beobachtungs- und Messsystem samt den dazu nötigen Systemen für Telekommunikation, Datenübertragung und -verarbeitung. Ausgehend vom damaligen Stand (3440 Bodenstationen, 619 Radiosondenstationen, 637 Radiowindstationen und 3691 Schiffe im Jahr 1967) sollte das bodennahe Netz weiter ausgebaut und dazu ein ständiges Satellitenbeobachtungssystem geschaffen werden, bestehend aus mindestens vier so genannten geostationären Satelliten sowie zwei Satelliten in polaren Umlaufbahnen. Das WWW-System wurde in den folgenden Jahren und Jahrzehnten bis zu seinem heutigen Umfang von rund 10000 Bodenstationen, 7000 Schiffs- und Meeresstationen, 300 Messbojen sowie insgesamt neun Satelliten erweitert und stellt mit seinen weltweiten Messungen vor allem der Troposphäre eine für die Klimaforschung weiterhin wichtige Datenquelle dar. Als weltweit umfangreichstes und gut organisiertes geophysikalisches Beobachtungssystem bildet es ein Kernstück des seit 1992 in Entwicklung befindlichen, jetzt alle ‚Sphären‘ umfassenden ‚Global Climate Observing System‘ (GCOS).“ (Boch 2002:129)

68 Bis in die 1970er Jahre hinein „there had never been a community of people working on climate change. There were only individuals with one or another interest who might turn their attention to some aspect of the question, usually just for a year or so before returning to other topics. An astrophysicist studying changes in solar energy, a geochemist studying the movements of radioactive carbon, and a meteorologist studying the global circulation of winds, had little knowledge and expertise in common. Even within each of these fields, specialization often separated people who might have had something to teach one another. They were unlikely to meet at a scientific conference, read the same journals, or even know of one another's existence. Nor did theorists interact regularly with people who worked out in the field. As one climate expert remarked, 'lack of interest has all too often characterized the attitude of physical scien-

entsprechend gab es unter ihnen noch relativ wenig konzeptionelle und methodische Übereinstimmung und seitens der Wissenschaft auch keine forschungsstrategischen Bemühungen um ein genuines Klimaforschungsprogramm.⁶⁹ Wenn man wiederum der Klimaforschung nicht genuin zurechenbare meteorologische bzw. geowissenschaftliche Forschungsarbeiten und die (standardisierte) Erhebung von Wetterdaten außen vor lässt, dürfte das Äquivalent der von ihr verbrauchten Forschungsmittel in dieser Phase weltweit von vielleicht 20 Mio. € auf um die 40 Mio. € angestiegen sein.⁷⁰

Mit dem Wandel des Klimaverständnisses von einem eher lokalen und stationären zu einem eher globalen und sich wandelnden Phänomen war das Erkenntnisinteresse der Klimaforschung, soweit als eigenständiges identifizierbar, zunächst einmal akademischer, wissenschaftliche Reputation versprechender Natur, das sich auf die Systematisierung, Einordnung, messtechnische Erfassung, computergestützte Modellierung und theoriegeleitete Erklärung von Klimaphänomenen und -prozessen richtete. Es war aber ebenfalls gesellschaftspolitischer Natur, da es ihm auch um die praxisrelevante Bestimmung von Klimaeinflüssen, um mögliche Klimabeeinflussung und um die Warnung vor einem möglichen Klimawandel ging⁷¹, wobei weiterhin außerwissenschaftliche, gerade auch militärische Interessen bei der Förderung und thematischen Ausrichtung der Klimaforschung zum Tragen kamen.

Die vierte Phase der Herausbildung einer eigenständigen multidisziplinären, auf potenziell anthropogen verursachten Klimawandel fokussierenden Klimaforschung (~1970 - ~1988) ist durch folgende soziale Strukturmerkmale gekennzeichnet:

Die Klimaforschung etablierte sich zusehends als eigenständiges multidisziplinäres problemorientiertes Forschungsgebiet mit eigenen (forschungsbezogenen, publizistischen und förderpolitischen) Organen und Zuwendungsressourcen, dem es um die Entwicklung eines systematischen Verständnisses von Klima und einer (theoriebasierten) Erklärung von Klimaänderungen ging, wobei anthropogene Einflüsse und deren Wirkungsweise eine wichtige, aber nicht die allein maßgebliche Rolle spielten. Kennzeichnend für diesen Prozess waren auf sozialer Ebene die Gründung, Einrichtung und Ausweitung von Klimaforschung betreibenden Instituten, von diese fördernden und administrierenden Institutionen, von Klimaforschungsprogrammen, von klimawissenschaftlichen Fachpublikationen und -journalen, von Konferenzen und Review-Berichten, von internationaler Kooperation bis hin zu Weltklimakonferenzen und dem World Climate Research Programme (WCRP). Auf kognitiver Ebene waren dies die Ergänzung respektive Verringerung von in vielfacher Hinsicht unzureichenden Daten mithilfe einer wachsenden Zahl von (oft international koordinierten) Messprogrammen, die konzeptionelle Verknüpfung des Klima bestimmender Faktoren einerseits als

tists to the masses of information produced by botanists examining pollen deposits and the data turned out by geologists, glaciologists, entomologists, and others. These types of literature have never been part of their regular diet.' (Lamb 1997:200)" (Weart 2005, *Climatology as a Profession*: 8)

- 69 „Nobody made a special effort to create a unified climate studies program, the kind of strong and independent institution that could fight for a big lump of funds (Hart 1992:17-22; Hart/Victor 1993). After all, scientists in the 1950s and 1960s saw global warming as only one of a thousand interesting questions, something that would not be a problem for many decades if ever, nothing at all to do with current government policies." (Weart 2005, *Government: The View from Washington*, DC: 8)
- 70 Demgegenüber versechsfachten sich die Mittel für meteorologische Forschung in den USA von 1958 bis 1967 (vgl. Weart 2005, *Government: The View from Washington*, DC: 6) und stiegen allein die Mittel für das Weather Bureau von 25 Mio. \$ in 1955 über 108 Mio. \$ in 1965 auf 230 Mio. \$ in 1975 (vgl. Nebeker 1995:173).
- 71 Während so ein stetiger Anstieg des CO₂-Gehalts der Atmosphäre eindeutig nachgewiesen wurde, wurde hingegen für die mittlere Temperatur (der Nordhemisphäre) ein leichtes Absinken beobachtet. Infolgedessen war trotz ersten Warnrufen und politischer Wahrnehmung eines anthropogen verursachten Treibhauseffekts ernsthaft noch keine wissenschaftlich akzeptierte Detektion und Attribution eines die globale Temperatur erhöhenden, anthropogen bedingten Klimawandels zu erwarten.

auch unterschiedlicher Forschungsmethoden andererseits, das Erkennen und die Berücksichtigung klimarelevanter Rückkopplungen in Klimamodellen und Messdateninterpretation, die Zentralität von nur mit dem Computer rechenbaren, sukzessive komplexer werdenden Klimamodellen und die gewonnenen unerwarteten Erkenntnisse, die aus teils eher zufällig entstandenen, dann sozial organisierten kognitiven Querverbindungen resultierten. Die Forschungsergebnisse ließen oft noch keine eindeutigen (theoretischen) Antworten auf die jeweiligen tiefer reichenden Forschungsfragen zu. Sie machten jedoch die Ausrichtung weiterer Untersuchungen der Klimaforschung und die Grundstruktur wissenschaftlicher Erklärungen von Klimawandel plausibel. Aufgrund unsicherer Daten und unzureichend komplexer Klimamodelle waren die Aufdeckung offener Forschungsfragen und vielfältige, primär wissenschaftsinterne Kontroversen um die Richtigkeit, Angemessenheit und Interpretation von Messdaten und Klimamodellen durchaus funktional und prägend für die weitere Entwicklung der Klimaforschung (vgl. Weart 2005), die etwa die Erklärung der Eiszeiten, die Rolle von Wolken, Aerosolen und weiteren Spurengasen, den Nachweis und den Einfluss variabler Sonnenaktivität oder das Ausmaß des anthropogen verursachten Temperaturanstiegs betrafen. In diesem Rahmen erscheint die sukzessive Entwicklung größerer und schnellerer Rechner, verbesserter Klimamodelle, neuer und besserer Messinstrumente und -verfahren einschließlich spezieller Satelliten als einsichtig und mehr oder minder zwangsläufig.⁷²

Während bis in die 1970er Jahre hinein das Verständnis des Klimasystems noch rudimentär war und sowohl eine globale Erwärmung als auch das Nahen einer neuen Eiszeit als durch anthropogene Emissionen wie zum einen Kohlendioxid oder zum anderen Schwefeldioxid und Aerosole begünstigt für möglich gehalten wurden, bildete sich im Gefolge diverser klima-wissenschaftlicher Messungen und Entdeckungen sowie gerade auch auf internationaler Ebene angesiedelter weiterer organisatorischer Verankerungen, Konferenzen und Assessment-Panels der Klimaforschung um 1980 in der Wissenschaft ein zunehmender Konsens heraus, dass insbesondere die anthropogen verursachten CO₂-Emissionen und die mit dem Treibhauseffekt einhergehende globale Erwärmung zweifellos ein in absehbarer Frist ernsthaftes Problem darstellten, auf das klimapolitisch umgehend reagiert werden sollte. Allerdings waren die zur Schließung wissenschaftlicher Kontroversen erforderlichen Mechanismen (Mobilisierung autoritativen Expertenwissens, Standardisierungsprozesse, Schlüsselexperimente) noch nicht ausreichend weit gediehen, um zwischen unterschiedlichen Einschätzungen und Erklärungen eines möglichen Klimawandels (wissenschaftlich verbindlich) entscheiden zu können.

Mit der (wellenförmig) anwachsenden Thematisierung eines vermutlich anthropogen verursachten Treibhauseffekts kam es im politischen und öffentlichen Diskurs – auch im Gefolge des in den 1980er Jahren entstandenen und wirksamen Ozonregimes – zu einer zunehmenden Verknüpfung von Interessen wissenschaftlicher, wissenschaftspolitischer und klimapolitischer Akteure, die mit klimapolitischen Intentionen und Aktivitäten renommierter Klimawissenschaftler⁷³, klimapolitischen Ambitionen von UNEP, WMO und ICSU (International Council of Scientific Unions), und der Vorbereitung und Einrichtung von aufgabenbezogenen Panels und Grenzorganisationen zwischen Klimawissenschaft und Klimapolitik einhergingen (vgl. Ingram/Mintzer 1990).

Nachdem das Klima auf der Stockholmer UN-Umweltkonferenz und über UNEP 1972 Eingang in den Themenkatalog der internationalen Umweltpolitik gefunden hatte, stand in den nachfolgenden

72 Voraussetzung für diese Prozesse waren natürlich die Existenz entsprechender Förderinteressen, vor allem in Wissenschafts-, Umwelt-, Wirtschafts- und Militärpolitik sowie die in diesem Wachstumsprozess aus *vested interests* und *sunk costs* resultierende Eigendynamik.

73 Dieses Engagement einiger solcher angesehenen, vor dem Treibhauseffekt warnender Wissenschaftler wie Hansen oder Schneider trug maßgeblich dazu bei, hierüber eine öffentliche Debatte anzufachen (vgl. Edwards 2007, Hansen 1988, 1994, Hansen et al. 1981, Schneider 1983, 1989, 1997, Weart 2005).

anderthalb Jahrzehnten die Forschungsförderung der Klimaforschung noch ganz im Mittelpunkt der Aktivitäten. Dabei reifte unter Forschern und Forschungsadministratoren allmählich der Konsens heran, „dass ein Atmosphärenforschungsprogramm wie GARP der Komplexität des – jetzt immer öfter so genannten – ‚Klimasystems‘ nicht angemessen sei, sondern vielmehr ein spezielles Klimaforschungsprogramm ins Leben gerufen werden müsse, eine Ansicht, die 1975 zu einer entsprechenden Entschließung der einflussreichen WMO“ (Boch 2002:131) und 1980 zum WCRP führte. Da sich das WCRP faktisch auf die Hauptkomponenten des physikalischen Klimasystems beschränkte und ein traditionelles Nebeneinander von biologischer und geowissenschaftlicher Forschung fortschrieb und es mit den großen internationalen Forschungsprogrammen der Biologie (dem „International Biological Programme“ 1965-1971 und dem „Man and Biosphere Programme“ seit 1971) in den beiden vorangegangenen Jahrzehnten praktisch keine Berührungspunkte gegeben hatte, kam es 1986 aufgrund einer entsprechenden Initiative der National Academy of Sciences (NAS) trotz zahlreicher Überschneidungen mit dem WCRP zur Gründung des IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme: A Study of Global Change).⁷⁴ „Mit dem WCRP und dem IGBP hatten sich in den Achtzigerjahren die zentralen internationalen Programme der naturwissenschaftlichen Klimaforschung etabliert, die mit einer Vielzahl von Kern- und Unterprojekten noch heute laufen.“ (Boch 2002:135)

Gegenüber teils zunehmend routinisierten meteorologischen wetterbezogenen Erhebungen und Untersuchungen, deren Daten durchweg von Interesse für die Klimaforschung waren und deren Ergebnisse des Öfteren zu unbeabsichtigten (zufälligen), aber für diese bedeutsamen Erkenntnissen führten, waren Umfang und Ressourcen genuiner Klimaforschung immer noch vergleichsweise gering.⁷⁵ Allerdings stiegen ihre Fördermittel im Laufe der 1970er Jahre durchaus an, von weltweit schätzungsweise 40 Mio. € auf über 100 Mio. €, um dann in den 1980er Jahren – infolge restriktiver umweltpolitischer Positionen der US-Regierung unter Reagan zunächst einmal nur mehr langsamer – bis 1988 auf rund 200 Mio. € zu wachsen.

Auch wenn sich die in den 1980er Jahren vielleicht 300 Vollzeit mit Klimafragen befassten Wissenschaftler⁷⁶ zunehmend auch als genuine Klimaforscher verstanden, blieben ihre problembezogenen Arbeiten und ihr fachbezogenes Selbstverständnis im Allgemeinen weiterhin auf die hierbei vorrangig zum Tragen kommenden Fächer wie Meteorologie, Ozeanografie, Atmosphärenphysik und atmosphärische Chemie (Atmosphärenwissenschaften), oder Geowissenschaften bezogen. Mit der Ausdifferenzierung und Etablierung der Klimaforschung als einem eigenständigen multidisziplinären problemorientierten Forschungsgebiet wurden die Klimaphänomene und -prozesse untersuchenden, bislang eher akademischen, unterschiedlichen Spezialgebieten zugehörigen Forschungsarbeiten vermehrt problemorientiert aufeinander bezogen, wobei ihre Themen und Untersuchungsdesigns zunehmend stark entlang (vor allem seitens der Klimaforscher selbst und verstärkt seitens der (internationalen) Klimapolitik) gesellschaftspolitisch definierter Problemlagen for-

74 „Because WCRP was seen as largely the vehicle of physical scientists, while IGBP was viewed largely as the vehicle of scientists active in biogeochemical cycles, and because both WCRP and IGBP were seen as scientific research programs, neither seemed to afford the venue that could generate the necessary confidence in the scientific and policy communities.“ (Fleagle 1994:179)

75 So trug auch das von 1971 bis 1975 laufende, mit 21 Mio. \$ ausgestattete CIAP (Climate Impact Assessment Program), seinerzeit eines der größten Forschungsprojekte mit dem Fokus auf die Umweltauswirkungen von Überschallflugzeugen, jährlich allenfalls 5 Mio. \$ zur Klimaforschung bei.

76 „Climate research remained quite a small field of science in the 1980s. Whereas any substantial sub-field of physics or chemistry counted its professionals in the thousands, the number of scientists dedicated full-time to research on the geophysics of climate change was probably only a few hundred worldwide... Since these climate scientists were divided among a great variety of fields, any given subject could muster only a handful of true experts.“ (Weart 2005, International Cooperation: 15)

muliert wurden, innerhalb derer erst genuin wissenschaftliche Forschungsfragen und -methoden ihren vorrangigen Stellenwert erlangten. Diese Problemorientierung kam – bei zugleich weiterhin bestehender disziplinär ausgerichteter Forschungsorientierung – auch in der (an wissenschaftsexterne Rezipienten gerichteten) Verknüpfung unterschiedlicher, das Klimaproblem betreffender Forschungsergebnisse in Studien, Reviews, Assessments und wissenschaftlichen Panels zum Ausdruck.

Bei der fünften Phase des politischen Durchbruchs und der sozial-organisatorischen Verankerung der Klimaforschung (~1988 - ~2000) handelte es sich im Prinzip um die Hochzeit einer nunmehr intensiv geförderten, stark grundlagenorientierten und zugleich politikberatend agierenden Klimaforschung, die sich einerseits in die Richtung immer komplexer werdender Erdsystemmodelle und -analysen ausweitete und andererseits grundlegende Fragen von Klimastruktur und -wandel zumindest in ihren Grundzügen überwiegend zu klären vermochte.⁷⁷ Entsprechend zeichnet sich diese Phase aus durch die sich überlappende Entwicklung des in der scientific community als hinreichend betrachteten und fast durchweg konsentierten Nachweises eines anthropogen verursachten Klimawandels auf kognitiver und sozialer Ebene im Wissenschaftssystem⁷⁸, die endgültige organisatorische und mentale Verankerung der Klimaforschung auf sozialer Ebene in Wissenschaft und Gesellschaft, und die Etablierung und Entscheidungsrelevanz von Klimapolitik auf (internationaler) politischer Ebene. Somit kann nunmehr von einer organisatorisch und förderpolitisch, kognitiv und sozialkommunikativ verankerten Ausdifferenzierung der Klimaforschung als einem erkennbar problemorientierten multidisziplinären Forschungsgebiet mit anthropogen verursachtem Klimawandel als sie organisierender Leitidee gesprochen werden. Die Klimaforschung verfügte über beträchtliche, eigenständig ausgewiesene Fördermittel und eigene Forschungszentren. Zudem vermochte sie (auch deshalb) über (neu gegründete,) in Wissenschaft und Politik wachsende Anerkennung und Legitimität gewinnende Grenzorganisationen wie insbesondere das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (vorübergehend) politikberatend in und zugunsten einer sich ihrerseits (international) etablierenden Klimapolitik zu agieren. Daraus resultierte eine entsprechende Eigenständigkeit und Eigendynamik der Klimaforschung.

Dabei führten die nicht zuletzt hierdurch mit angeregte weitere Entwicklung und Expansion von Computern, Satelliten, Messinstrumenten, Messnetzen und großen (internationalen) Projektverbänden zu einer immer mehr Phänomenbereiche einbeziehenden, auf möglichst umfassende Erklärung abzielenden Ausrichtung der Klimaforschung, bis hin zu Erdsystemanalysen, zu entsprechend komplexeren gekoppelten Klimamodellen, einschließlich von systematischen Modellvergleichen und Ensemble-Simulationen, zu einem immensen Hunger nach Messdaten einschließlich von Re-Analysen und Datenassimilation, und zur Ausweitung und Einrichtung von auf das Klima ausgerichteten wissenschaftlichen Veranstaltungen, Veröffentlichungen und Ausbildungskursen. Damit einher ging die allmähliche Ausbildung einer freilich recht segmentierten Community/Produktionsgemeinschaft der Klimaforschung, deren Mitglieder zugleich ihren jeweiligen Specialties und Disziplinen angehör(t)en, wie dies für problemorientierte Forschung typisch ist. Ebendiese wei-

77 Bei gegebenem Stand der Forschung war es in dieser Phase möglich, ungeklärte, Klimaprozesse und Klimawandel betreffende Fragestellungen und mit ihnen verbundene kontroverse Erklärungshypothesen zu präzisieren, deren streitige Punkte herauszuarbeiten und ihre mögliche Klärung zumindest eindeutig anzuvisieren.

78 „The increasingly unequivocal and occasionally activist stance of many climate scientists continued to be opposed by a respectable minority. Some of the critics argued publicly that the 20th century's global warming (if it existed at all) had come only because the sun had temporarily become more active. By the end of the 1990s they had some plausible data and theories to back them up, but most experts felt the case was weak.” (Weart 2005, *The Public and Climate Change* (continued, 1980-2001): 20)

sen allerdings oft selbst teildisziplinäre Überlappungen und Mehrfachreferenzen auf. Umgekehrt implizierte die zunehmende Komplexität und Differenziertheit dieses problemorientierten Forschungsgebiets mehr oder minder zwangsläufig Fragmentierungstendenzen, die durch eine entsprechende Forschungsorganisation und eine (sekundäre) professionelle Identität als Klimawissenschaftler in Grenzen zu halten versucht wurden und werden.

Nachdem insbesondere spezifische äußere Ereignisse Klimaforschung und Klimapolitik als damals durchaus bereits existierende und ausgeübte wissenschaftliche und politische Praxen um das Jahr 1988 zum Durchbruch verholfen hatten, bestanden die entscheidenden weiterreichenden Entwicklungen dieser Phase in den folgenden vier Entwicklungstrends:

1. Zum einen gelang es der Wissenschaft, gegen nicht unbeträchtliche Widerstände und gegenläufige Interessen (vgl. Agrawala 1997, 1998a, 1998b, Alfsen/Skodvin 1998, Böhmer-Christiansen 1993, 1994a, 1994b, Edwards/Schneider 1997, 2001, Siebenhüner 2006, Skodvin 1999, Weart 2005) das IPCC auf der Basis eines hierfür geeigneten Procedere von aufwändigen, ausgefeilten, durch Peer Review geprägten Verfahren der Berichterstellung (vgl. IPCC 1993, 1999b) allmählich (ab dem 3. IPCC-Bericht (TAR)) als wissenschaftsintern und -extern anerkannte Instanz wissenschaftlicher Autorität zu etablieren, die innerwissenschaftlich zu einem anerkannten Review-Organ ohne signifikante (wissenschafts-)politische Einflussmöglichkeiten wurde und außerwissenschaftlich als Grenzorganisation mit Vetorecht in Abstimmungsprozessen mit politischen Akteuren klimapolitisch relevante Dossiers als „Summary for Policymakers“ formuliert(e).⁷⁹ „Die Klimaforschung und ihre internationalen Projekte wurden zu einer wichtigen Größe der Problemdefinition, der Prognose und der möglichen politischen Lösung in diesem Feld und gleichzeitig näherte ihre Expansion und zunehmende Öffentlichkeitspräsenz die Agenda von Forschung und Klimapolitik einander an. Mit der zunehmenden Komplexität der Modelle, Ansätze und Theorien dehnten sich die Fragen des Klimas sukzessive auf eine ganze Reihe angrenzender Naturwissenschaften und im Hinblick auf die natürlichen, sozialen und ökonomischen Folgen möglicher Klimaveränderungen noch auf ein breites Spektrum geistes-, sozial- und humanwissenschaftlicher Disziplinen aus.“ (Boch 2002:136)
2. Über die genuine Klimaforschung hinaus, die vorrangig auf eine möglichst weitgehende und eindeutige Erklärung des gesamten Klimasystems samt damit verbundener Modellentwicklungen und -simulationen sowie umfangreicher vielfältiger Erhebungen von Messdaten abzielt, entwickelte sich vor dem Hintergrund einer allgemein wachsenden Anerkennung eines absehbaren und stattfindenden (anthropogen verursachten) Klimawandels in dieser Phase die Klimafolgenforschung, die die ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Folgen dieses Wandels und mögliche Anpassungsstrategien in einem ganzen Bündel verschiedenartigster Fragestellungen, Konzeptionen und Forschungsdesigns untersucht (vgl. Berz 2002, Edenhofer et al. 2006, Fabian/Menzel 2002, IPCC 2001c, 2001d, 2007b, 2007c, Hinkel/Klein 2006, Parry/Carter 1998, PIK 2003, Root et al. 2005, Schneider 2002, Wellington et al. 2007).
3. Außerdem geriet die Identifizierung und Entwicklung von Anpassungs- und Vermeidungstechnologien zur Bewältigung des Klimawandels verstärkt in den Blickwinkel der Klimapolitik, die mit anderen Fragen und Problemen, nämlich solchen technischer und wirtschaftlicher Machbarkeit und Tragfähigkeit, verbunden sind als die Analyse des Klimasystems.

⁷⁹ „Under pressure from the industrial forces, and obeying the mandate to make only statements that virtually every knowledgeable scientist could endorse, the IPCC's consensus statements were highly qualified and cautious. This was not 'mainstream' science so much as conservative, lowest-common-denominator science. When the IPCC finally announced its conclusions, however, they had solid credibility.“ (Weart 2005, International Cooperation: 18)

4. Schließlich bildete sich in dieser Phase über die UNCED-Konferenz in Rio de Janeiro 1992 und das Kyoto-Protokoll 1997 ein internationales Klimaregime heraus, in dessen Rahmen klimapolitische Strategien und Maßnahmen – unter Berücksichtigung der IPCC-Berichte – entworfen, erörtert, verhandelt und ansatzweise umgesetzt wurden (vgl. Clark/The Social Learning Group 2001, Gehring 1994, Haas et al. 1993, Kasperson/Kasperson 2000, Keohane/Levy 1996, Miller/Edwards 2001, Mitchell et al. 2006, Oberthür 1993, 1997, Oberthür/Ott 1999, O’Riordan/Jäger 1996, Rayner/Malone 1998, Schneider et al. 2002, Victor 2001, Victor et al. 1998, Young 1999, 2002). Diese Analyse möglicher Anpassungs- und Bewältigungsstrategien und dazu dienender Klimatechnologien wurde von der Klimapolitik durchaus strategisch bewusst angeregt und gefördert, da hier das für ihre konkrete Gestaltung und die damit verbundenen Interessenkonflikte und Aushandlungsprozesse letztlich relevante Wissen erzeugt wird. Infolgedessen wurden, wenn auch konzeptionell weniger integriert, nicht nur auf der Ebene von Politikberatung, sondern auch von weiteren Forschungsschwerpunkten neben der (naturwissenschaftlichen) Untersuchung der das Klima und seine Veränderungen einschließlich anthropogener Einflüsse prägenden Faktoren und (Rückkopplungs-) Prozesse diejenigen der verschiedenen Folgen des Klimawandels und der bestehenden (sozialstrukturellen) Anpassungs- und Bewältigungsmöglichkeiten als wesentliche (eigenständige) Bestandteile der Klimaforschung etabliert und in eigenen IPCC-Arbeitsgruppen (WG II und WG III) behandelt.⁸⁰ Hierbei handelt es sich um eine eindeutig problemorientierte und daher klimapolitisch gewollte institutionelle Zuordnung, die (zunächst) weniger auf eine substanziell weitergehende konzeptionelle Integration abzielte.

Im Kontext dieser Entwicklungstrends stiegen die für die genuine Klimaforschung verfügbaren Mittel stark an: von vielleicht 200 Mio. € in 1988 über ca. 1 Mrd. € in 1990, ca. 2 Mrd. € in 1992/93, ca. 3 Mrd. € in 1995 auf ca. 4 Mrd. € in 1997, um danach kaum mehr anzusteigen. Hierbei dürfte der Anteil der US-Mittel weiterhin mindestens 50% betragen haben (vgl. US Climate Change Science Program and the Subcommittee of Global Change Research 2003).⁸¹ Damit verzwanzigfachten sich die Mittel für die Klimaforschung in knapp zehn Jahren, was erst ihre Ausweitung, eine analoge Zunahme der Zahl der Klimaforscher und die genauere Datenerhebung und Modellierung von Klimaprozessen in ihren Forschungsarbeiten ermöglichte und zudem ihre gestiegene gesellschaftliche und politische Relevanz belegt.

Erkenntnisinteresse und Stoßrichtung der Klimaforschung lassen sich in dieser Phase grob markieren als gerichtet auf die grundlegende (physikalische, chemische, biologische) Theorien (in den Geowissenschaften) kombinierende Erklärung des Klimasystems Erde, die dabei zum einen (als finalisierte Anwendungsgrundlagentheorie; vgl. Krohn/Schäfer 1978) ein spezifisches einzelnes System analysiert und zum anderen dessen gezielte (klimapolitisch gewollte) Beeinflussbarkeit in multidisziplinärer Herangehensweise problemorientiert untersucht. Deshalb kommen in diesem Zusammenhang zunehmend weitere, auf Klimafolgen und Klimatechnologien abhebende Forschungsstränge zum Tragen, die mit der genuinen Klimaforschung auf kognitiver Ebene nur lose verbunden sind. Darüber hinaus beeinfluss(t)en die Interaktionsprozesse zwischen Klimaforschung und Klimapolitik Themenwahl, Fördervolumen, Organisation und Einbettung vieler, insbesondere

80 Die politische Relevanz ihrer Schlussfolgerungen ist allerdings bislang zumeist begrenzt, da diese vielfach aus allgemein gehaltenen Formulierungen (über existierende Reduktionspotenziale von Treibhausgasemissionen, zu entwickelnde Klimatechnologien und ebendies behindernde soziale Barrieren) bestehen und unvermeidlich mit großen Unsicherheiten und normativen Prämissen behaftet sind (vgl. IPCC 1996b, 2001c, 2001d, 2007b, 2007c).

81 Grob geschätzt dürften sich die Anteile an der Klimaforschung von den USA auf gut 50%, von Europa auf ca. 30%, von Japan auf ca. 10% und von Australien, Kanada und dem Rest der Welt auf nochmals 10% belaufen.

der großen, zumeist im Rahmen des WCRP durchgeführten (internationalen) Forschungsvorhaben.

Die mit den oben aufgezeigten Entwicklungstrends verknüpften sozialen Strukturmerkmale kamen in der sechsten Phase der Klimaforschung (ab ~2000) verstärkt zum Tragen. So lassen sich beobachten:

- ein Übergang zu normal science mit der Verfeinerung, Überprüfung und Absicherung der bislang gewonnenen Erkenntnisse sowie der Fortführung und Ausweitung der Messprogramme und Modellsimulationen, einschließlich von – allerdings im Detail noch relativ wenig substanzial konkretisierten – Erdsystemmodellen⁸²,
- die Bedeutungszunahme der auf die Entwicklung von Klimatechnologien orientierten ingenieurwissenschaftlich bestimmten Klimaforschung,
- eine entsprechende Gewichtsverschiebung in der Verteilung der Fördermittel,
- die trotz politischer Irritationen⁸³ zunehmend routinisierte und die Klimaforschung selbst auch zeitlich mit strukturierende Erstellung des 4. IPCC-Berichts (AR4) als allgemein anerkannter Review des Standes der Klimaforschung
- und die Etablierung von klimawissenschaftlichen Ausbildungsmodulen in verschiedenen geowissenschaftlichen Studiengängen.

Erwähnt seien in diesem Zusammenhang insbesondere

- die systematische Einbeziehung von immer mehr Bereichen und Prozessen in Klimatheorien und -modelle⁸⁴,
- die verstärkte Untersuchung der Kryosphäre samt der Vorbereitung des internationalen Polarjahres 2008, wobei die Arktis die relativ stärksten Temperaturanstiege aufweist,
- die auf Standardisierung von Modellen und Kopplern und auf validere Klimasimulationen abzielenden, neu formierten Netzwerke und Organisationen zum Aufbau einer Infrastruktur für den Betrieb und Vergleich verschiedener Klima- einschließlich Erdsystemmodelle, wie ENES, PRISM, ENSEMBLES, ESMF, PCMDI, um besseren Zugang, Austausch und Evaluation, Kooperationen, die Verknüpfung von Modell-Modulen, die systematische Speicherung von Mo-

82 Ebenso zu nennen sind umfassendere Studien von globalem Wandel, mehr regionale Klimastudien und -modelle, validere und verfeinerte Rekonstruktionen früherer Klimata, und vermehrte und verbesserte Klimaprojektionen und -szenarien.

83 In diesen kamen unterschiedliche klimapolitische Positionen der USA, der EU und anderer Länder zum Ausdruck (vgl. Al Gore 2007, Dessler/Parson 2006, Gelbspan 2004, Weart 2005, International Cooperation: 26)

84 Zunehmend systematisch einbezogen in Klimatheorien und Klimamodelle werden etwa Kryosphäre, Wolken, unterschiedliche Aerosole, u.a. Rußpartikel, Aerosol-Wolken-Wasserdampf-Rückkopplungen, biogeochemische Kreisläufe, insbesondere der Kohlenstoffkreislauf, Vegetation, die Landoberflächen betreffende Prozesse wie veränderte Landnutzung, Atmosphäre-Ozean-Wechselwirkungen, paläoklimatische Daten, vor allem der Eiszeiten, sowie regionale Klimamodelle und -projektionen. Dies wurde auch möglich durch das allmähliche Vorliegen ausreichend langer und umfangreicher Datenreihen sowohl aus Satellitenmessungen als auch aus z.B. aus Eiskernen gewonnenen Proxydaten einerseits, sowie infolge einer mithilfe von Re-Analysen konsistenteren Datenbasis andererseits, und schlug sich nieder in der Anknüpfung immer weiterer Klimamodell-Module, der Einbettung hochauflösender Teilmodelle, der Modellierung von immer mehr Rückkopplungen und einer zunehmend auf der Interaktionsdynamik der Phänomenbereiche und Einflussfaktoren basierenden Erklärung des Klimasystems. Allerdings ist die entsprechende Erweiterung der rechenintensiven AOGCMs (atmosphere-ocean general circulation models) bislang meist immer noch mehr anvisiertes Programm als bereits reale Simulationspraxis.

- dellergenergebnissen, umfassende Vergleichsprojekte und standardisierte Ensemble-Simulationen zu ermöglichen und zu erleichtern⁸⁵,
- der vermehrte rasche Austausch von Mess- und Modelldaten, der sich aufgrund des (Komplexitätsbedingten) Abgleichs, Berücksichtigung und Koordination von Untersuchungen und Untersuchungsergebnissen als notwendig erweist,
 - die Vielzahl an internationalen Kooperationsprogrammen und -projekten (mit einer kaum mehr überschaubaren Zahl von Acronymen), vor allem im Rahmen der WMO-Forschungsprogramme von WCRP, IGBP, IHDP (International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change) und DIVERSITAS, samt der problemorientierten Verknüpfung von Klimamodellen mit anderen Bereichen und Konzepten, etwa im Rahmen von ESSP (Earth System Science Partnership),
 - die Erörterung und Berücksichtigung von systematischen Grenzen der Klimamodellierung und -prognosen,
 - die trotz der damit verbundenen paradigmatischen Verschiebung systematischere und intensivere Untersuchung von Formen und Ursachen abrupten Klimawandels
 - und eine verstärkte Klimafolgenforschung.⁸⁶

Daneben sind die fortlaufenden, bislang allerdings mit nur wenig Erfolg gekrönten klimapolitischen Verhandlungs- und Bargainingprozesse mit dem offiziellen Ziel eines effektiven Klimaschutzes jenseits des 2005 in Kraft getretenen Kyoto-Protokolls zu nennen, wobei selbst starke ökonomische, am längerfristigen Eigeninteresse der Akteure ausgerichtete Argumente, die auf die gegenüber wirksamen Anpassungs- und Vermeidungsstrategien wesentlich kostenträchtigeren Folgen eines bereits absehbaren und nicht gebremsten Klimawandels abheben, bislang noch kaum klimapolitische Durchschlagskraft entwickelten (vgl. Dessler/Parson 2006, Stern 2007).⁸⁷

Sozialstrukturell besitzt die Klimaforschung aufgrund ihres Gegenstands, ihrer Verfahren und ihrer Organisation, einschließlich ihrer Einbettung in Wetterforschung und Geowissenschaften heute alle Merkmale einer modernen *big science*. Zwangsläufige Folge hiervon ist, dass – wie in anderen Gebieten moderner Großforschung – kein einzelner Wissenschaftler mehr das gesamte Feld der Klimaforschung überblicken kann.⁸⁸ Grundsätzliche Kontroversen um Klimatheorien, -modelle oder -messdaten, die über im Rahmen normaler wissenschaftlicher Forschung typischerweise übliche, spezifische Fragestellungen, Konzepte und Erklärungen betreffende Dispute⁸⁹ weit hinausgehen, finden in dieser Phase weitgehend nur noch als wissenschaftsexterne im politischen Raum statt.

85 „Overall, the vigorous, ongoing intercomparison activities have increased communication among modelling groups, allowed rapid identification and correction of modelling errors and encouraged the creation of standardised benchmark calculations, as well as more complete and systematic record of modelling progress.“ (IPCC 2007a:594)

86 Im Vordergrund stehen dabei die Identifikation und Analyse der voraussichtlichen (regionalspezifischen) Folgen typischer Phänomene und Entwicklungstrends, wie mehr warme und weniger kalte Tage und Nächte, Hitzewellen, mehr Unwetter, mehr Trockenheiten, mehr Zyklone oder mehr Überflutungen, auf Bereiche wie Ökosysteme, Land- und Forstwirtschaft, verfügbare Wasserressourcen, menschliche Gesundheit, Siedlungsstrukturen oder Industriesektoren (vgl. IPCC 2007b).

87 Kennzeichnend hierfür sind etwa die massiven, gegenüber früheren IPCC-Berichten verstärkten Bemühungen der Regierungsvertreter Chinas, Russlands, Saudi-Arabiens und der USA, auf die Summary for Policymakers der IPCC-Berichte sämtlicher Arbeitsgruppen zugunsten abgeschwächter Formulierungen Einfluss zu nehmen, aber auch deren nur begrenzte Durchsetzungsfähigkeit angesichts mehrheitlich gegenläufiger Positionen in der Gesamtheit aller Regierungsvertreter beim IPCC.

88 So lässt sich z.B. mittlerweile die weitgehende Trennung von Forschung und Programmierung in der Klimamodellierung bei Festschreibung ihrer theoretischen Standards beobachten.

89 Mit der Bestätigung einer Reihe grundlegender Erklärungskonzepte des Klimawandels auf der Basis dieser Fortschritte wurden (wissenschaftliche) Kontroversen um Grundformen von Struktur, Wandel und Prozessmustern des Klima-

Auch unter Berücksichtigung der Einrichtung entsprechender klimawissenschaftlicher Ausbildungsmodule in geowissenschaftlichen Studiengängen handelt sich bei der Klimaforschung weiterhin um problemorientierte multidisziplinäre Forschung, die inzwischen institutionell breit etabliert und sozial vielfältig verankert ist.⁹⁰ Die globale Zahl der Klimaforscher dürfte dabei – je nach Abgrenzung⁹¹ – eine Größe zwischen 5.000 und 50.000 erreicht haben.

Die für genuine Klimaforschung weltweit verfügbaren Fördermittel stagnierten bei ca. 4 Mrd. €, wobei sie in einzelnen Ländern wie z.B. Japan durchaus noch um 25% anwuchsen. Demgegenüber stiegen die Mittel für die Entwicklung und Markteinführung von Klimatechnologien⁹² in dieser Phase auf die gleiche Größenordnung an, wobei deren Abgrenzung etwa gegenüber bereits verfolgten Energietechnologien nicht eindeutig ist.

Mit nachlassendem externen (politischen) Steuerungsinteresse weist eine zum einen problemorientierte, zum andern zugleich grundlagenorientierte Klimaforschung – ähnlich wie die Ozonforschung – verstärkt die Kennzeichen einer reputationsgesteuerten, aber faktisch auch an Mertons Normen wissenschaftlicher Forschung orientierten, gegenüber direkten externen Steuerungsversuchen resistenten (finalisierten) Forschung auf, insofern ihr Erkenntnisinteresse dem grundlegenden und zugleich detailgenauen Verständnis des Klimasystems und -wandels und den Aussichten von dessen Begrenzung gilt.

Betrachtet man nun Ausformung und Veränderung der beschriebenen Strukturmerkmale der Klimaforschung im historischen Längsschnitt, so ergibt sich in seinen Grundzügen etwa folgendes Bild: Bis zum Ende des 19. Jahrhunderts entwickelte sich eine beschreibende, auf Regionen bezogene, vorrangig in der Geografie verankerte Klimatologie mit auf Einzelphänomene ausgerichteten Erklärungen, jedoch ohne genuine Klimatheorie, und mit auf systematische Wetterbeobachtung und -prognose ausgerichteter internationaler Kooperation.

In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurden vor allem von Atmosphärenphysikern und Amateurwissenschaftlern viele aus heutiger Sicht für das Verständnis des globalen Klimas und seiner Veränderungen grundlegende Fragen thematisiert, Theoreme erörtert und Entdeckungen gemacht, die jedoch häufig in der fachlich zuständigen Meteorologie aus teils guten Gründen wenig Anerkennung fanden und zu keinem für sie relevanten Forschungsthema wurden.

Nach dem Zweiten Weltkrieg erlebte die Klimaforschung bis ca. 1970 auf der Grundlage neuer Messverfahren und Datierungstechniken, vielfältig ausgeweiteter Messungen und expandierender Rechnerkapazitäten im Rahmen verstärkter Wetterforschung, aufstrebender Geowissenschaften und militärischer Interessen an einer Klimabeeinflussung einen gewissen Aufschwung mit der Entwicklung und Verbesserung von globalen Klimamodellen und dem eindeutigen Nachweis ansteigenden Kohlendioxidgehalts der Atmosphäre, der im Zuge des in den Industriestaaten seit den 1960er Jahren zunehmend öffentlich und politisch diskutierten Umweltthemas in ersten Warnrufen renommierter Wissenschaftler vor einer anthropogen bedingten Klimaerwärmung gipfelte.

systems, wie sie in den vorangehenden Phasen aus durchaus guten Gründen existierten, weitgehend abgeschlossen und verlagerten sich kontroverse Erklärungen und Deutungen zunehmend in Spezialbereiche, wie z.B. Wolkenmodellierung.

- 90 Die Klimaforschung nimmt in mit ihr befassten einzelnen Fächern mittlerweile ein durchaus beachtliches Gewicht ein, das je nach Fach deutlich schwankt und zwischen 10% und 30% liegen dürfte.
- 91 Nicht alle sind Vollzeit mit Klimaforschung beschäftigt. Die Erhebung von meteorologischen (Wetter-)Daten, Start und Kontrolle von Satelliten und die Erfassung von Satellitendaten sind der Klimaforschung allenfalls teilweise zuzurechnen.
- 92 Diese zielen etwa ab auf größere Energieeffizienz, C-Speicherung und -Sequestrierung, verbesserte Transportsysteme und -technologien, verringerte Treibhausgasemissionen oder verbesserte Mess- und Monitoringsysteme von Treibhausgasen (vgl. IPCC 2005, 2007b, 2007c).

Zwischen 1970 und 1988 bildete sich dann eine eigenständige multidisziplinäre Klimaforschung mit ersten (internationalen) Klimakonferenzen und der Einrichtung eines Weltklima-Forschungsprogramms heraus, die die Frage nach einem anthropogen verursachten Klimawandel verstärkt untersuchte und erörterte und sich mit den (chaostheoretischen) Grenzen eindeutiger Klimaprognosen konfrontiert sah; das gleichzeitig wachsende Interesse der Politik am Klimawandel resultierte dabei vor allem aus deren forcierter und relativ erfolgreicher Auseinandersetzung mit dem Ozonproblem.⁹³

1988 erfolgte der politische Durchbruch von anthropogen verursachtem Klimawandel zum Thema der Klimapolitik mit einem massiven Anstieg der Förderung der Klimaforschung. Diese etablierte sich sozial und institutionell in einer sich ausweitenden, multidisziplinären Vielfalt (an Forschungsprojekten, involvierten Fächern, Forschungsgruppen, Instituten, Fachzeitschriften etc.) mit dem IPCC als wissenschaftsintern und klimapolitisch zunehmend anerkanntem Review-Organ und Grenzorganisation zwischen Klimawissenschaft und -politik, das zur Schließung grundlegender Kontroversen und Konsensbildung in der Klimaforschung maßgeblich beitrug.

Neben der Gewinnung immenser Mengen von wichtigen Klima- und Proxydaten und der Entwicklung umfassender Klimamodelle gewannen auch die Klimafolgenforschung und die Entwicklung von zur Minderung und Bewältigung des absehbaren Klimawandels beitragenden Klimatechnologien allmählich an Gewicht.

Diese erlangen nach der Jahrhundertwende zunehmend klimapolitische Priorität, nachdem die Klima und Klimawandel im Kern erklärenden Klimatheorien weitgehend bestätigt und akzeptiert wurden und nunmehr deren Ergänzung, Verfeinerung, Ausweitung auf Erdsystemmodelle und in Klimamodellen zu gewährleistende Integration sowie die Untersuchung spezifischer (kleinskaliger) Phänomene, regionaler Klimata und abrupten Klimawandels die Klimaforschung prägen.

Ein wenig zugespitzt lassen sich dabei folgende markante Entwicklungslinien der sozialen Strukturmuster der Klimaforschung festhalten:

1. Gegenüber einer zunächst auf die Erfassung als stationär angenommener regionaler Klimata ausgerichteten Klimatologie dominiert heute in der Klimaforschung konzeptionell das Bild eines globalen Klimawandels.
2. Standen früher eher die Beobachtung des natürlichen Klimas und die angesichts der vorliegenden Daten durchaus begründete Zurückweisung anthropogen verursachten Klimawandels im Vordergrund, so ging es später gerade um den Nachweis desselben und die Untersuchung seiner Konsequenzen und möglicher (technologiebasierter) Klimastrategien.
3. Während Klimamodelle und -theorien anfangs stark auf durch einfache (physikalische und chemische) Messdaten gestützten plausiblen Vermutungen und Spekulationen beruhten, basieren sie heute neben In-situ-Messwerten vor allem auf mithilfe diverser klima- und messtheoretischer Theoreme transformierten bzw. erzeugten (virtuellen) Klimadaten aus Satellitenmessdaten, Klimasimulationen, Re-Analysen und Proxydaten.⁹⁴

93 „As politics was caught up with ozone, climate change was born in politics.“ (Usher, zitiert in Agrawala 1998a:614)

94 Mit der Mischung von Modellen und Beobachtung, der Verwendung semi-empirischer Parameter und der Nutzung problematischer Satellitendatensätze gehen durchaus nichttriviale Probleme der empirischen Validität der verwandten Daten einher, wie Edwards (2002:146) festhält: „Erstens hält die Trennung zwischen Modell und Daten, auf der dieser Sound-Science-Standard beruht, einer näheren Prüfung nicht stand. Alle modernen globalen Datensätze sind in gewissem Umfang durch Modelle aufbereitet. Zweitens ist die Annahme, dass aus beobachteten historischen Trends eine lineare Extrapolation in die Zukunft erfolgen kann, selbst ein Modell. Bei einem höchst komplexen System wie dem Klima mit seinen zahlreichen Ursachen für positive oder negative Rückkopplungen dürfte dieses Modell zu denen gehören, deren Richtigkeit am unwahrscheinlichsten ist, da es überhaupt nicht auf physikalischer Theorie gegründet ist.“

4. Trotz der damit einhergehenden methodologischen Schwachstellen (vgl. Edwards 1999, 2001, 2002, Gramelsberger 2004, 2007) dürften heutige Klimamodelle und -theorien auf relativ gut abgesicherten Erkenntnissen und Befunden beruhen, sodass (frühere) Kontroversen zwischen mehreren grundsätzlich unterschiedlichen, miteinander konkurrierenden Erklärungsmodellen in sukzessiven, teils Jahrzehnte währenden Schließungsprozessen abgeschlossen werden konnten, und heute eher für den Bereich von normal science typische Kontroversen zu beobachten sind.
5. Von einer im Wesentlichen in der Atmosphärenforschung (und Ozeanografie) angesiedelten Klimaforschung weitet diese sich mit wachsender Erkenntnis der vielfältigen Rückkopplungsmechanismen durch Einbeziehung von immer mehr Sphären und Phänomenen tendenziell zur Erdsystemanalyse aus, in der die aus diesen Rückkopplungen resultierende Interaktionsdynamik einen maßgeblichen Stellenwert gewinnt, wobei neben primär physikalischen zunehmend chemische und biologische, und im Falle der Einbeziehung der ‚Anthroposphäre‘ auch soziale, vor allem ökonomische Erklärungen treten.
6. Die Klimaforschung entwickelte sich von einem eher nachrangigen Teilgebiet der Geografie und der sich etablierenden Meteorologie zu einem organisatorisch, förderpolitisch und teils auch konzeptionell eigenständigen (problemorientierten multidisziplinären) Forschungszweig. Dabei formierten sich einerseits genuine Programme und Institute der Klimaforschung und fand andererseits auch eine Ausweitung der Klimaforschung in den sie prägenden geowissenschaftlichen Fächern statt.
7. Aus früher unterschiedlichen Fächern und Disziplinen zugehörigen Klimaforschern hat sich dabei allmählich eine eigene Community bzw. Produktions- und Problemgemeinschaft der Klimaforschung herausgebildet, die ihre (wissenschaftlichen) Kontroversen mit autoritativen Assessments zu lösen imstande ist. Zugleich ist sie ihrerseits u.a. aufgrund der Komplexität ihres Gegenstandsbereichs fragmentiert, wobei ihre Mitglieder zugleich meist weiterhin auch ihrem Heimatfach und Herkunftsdisziplin verbunden bleiben, was für ein problemorientiertes multidisziplinäres Forschungsfeld durchaus angemessen erscheint.
8. Spielten in den frühen Phasen konzeptionell herausragende (theoretische und empirische) Arbeiten einzelner Wissenschaftler für die Entwicklung der Klimaforschung eine zentrale Rolle, so prägt diese heute eine international vernetzte Großforschung mit Supercomputern, Satelliten, weltweiten Messnetzen mit einem immensen Datenanfall und technisch aufwändiger Gewinnung von Proxydaten wie z.B. Eiskernbohrungen und Sedimentanalysen.⁹⁵
9. Entsprechend entwickelte sich die Klimaforschung von individuellen institutsbasierten Forschungsprojekten zu darüber hinausgehenden Forschungsverbänden⁹⁶ mit weltweiter Kooperation, Datenaustausch, (Modell-)Vergleichsprojekten, Reviews, Assessment-Panels und Grenzorganisationen wie dem IPCC, die die Kommunikation und den Austausch mit der Förder- und Klimapolitik organisieren.
10. Die für die Klimaforschung weltweit verfügbaren Ressourcen stiegen bis Ende der 1990er Jahre mehr oder weniger kontinuierlich an⁹⁷ und blieben seitdem ungefähr konstant, wobei sie im

95 Dies bedeutet nicht, dass nicht auch noch in den letzten Dekaden einige herausragende Forscherpersönlichkeiten (z.B. Bolin, Hansen, Keeling, Manabe; Meehl, Sabine, Tans) Stoßrichtung, Glaubwürdigkeit, wissenschaftliche und gesellschaftliche Relevanz der Klimaforschung maßgeblich mit prägten.

96 Erwähnt seien in diesem Zusammenhang die bereits im 19. Jahrhundert bestehenden frühzeitigen Bemühungen um koordinierte, aufeinander abgestimmte Forschungs- und Messaktivitäten im Rahmen von Wettervorhersage und meteorologischer Forschung.

97 von vielleicht 10 Mio. € Anfang des 20. Jahrhunderts über ca. 40 Mio. € um 1970, 100 Mio. € um 1980 und 1 Mrd. € um 1990 auf 4 Mrd. € Ende der 1990er Jahre

Wesentlichen erst seit den 1970er Jahren als explizit der Klimaforschung zuzurechnende aufgeführt wurden.⁹⁸ Dabei trugen die USA (auch nach ihrem Ausstieg aus dem Kyoto-Protokoll) durchweg mindestens die Hälfte aller Ausgaben für die Klimaforschung. – Mit der Gewichtsverlagerung in Klima- und Forschungsförderpolitik von der Klimaforschung zur Entwicklung von Klimatechnologien dürfte sich die Hochzeit ersterer dem Ende zuneigen.⁹⁹

11. Aufgrund ihrer enormen Abhängigkeit von unterschiedlichen und für die jeweilige Messgröße möglichst vielen Messdaten beruhen viele Erkenntnisse der Klimaforschung und deren Reliabilität und Validität auf dem kumulativen Charakter erhobener Daten und Klimasimulationen.¹⁰⁰

Mit Blick auf die historische Entwicklung der Klimaforschung im vergangenen Jahrhundert ist z.B. mit Stehr/Storch (2003) insbesondere das sich wechselseitig verstärkende positive Zusammenwirken folgender klimawissenschaftlicher Makrotrends hervorzuheben:

- die Verwissenschaftlichung der Klimaforschung,
- nach der Entdeckung der (auch anthropogenen) Veränderbarkeit von Klimata – die Ausdehnung von Klimaanalysen in die Vergangenheit und Zukunft (Paläoklimatologie, zukünftige Klimaszenarien und Klimawandel),
- die Messbarkeit des ‚Klimas‘ durch satellitenbasierte Beobachtungssysteme, die den gesamten Globus abdecken,
- und die durch die Mathematisierung von Physik induzierte Mathematisierung von Meteorologie, Ozeanografie und Klimaforschung auf der Grundlage von zunehmend leistungsfähigeren Computern und hierdurch möglichen komplexen Klimamodellen.

Als Gesamtbild schält sich somit heraus, dass zum einen der größte Teil klimawissenschaftlichen Wissens erst in den letzten Dekaden erlangt wurde¹⁰¹ und zum anderen die Mehrzahl zentraler Aussagen und Theoreme über Klimastruktur und -wandel überwiegend erst in den beiden letzten Jahrzehnten als wissenschaftlich anerkannte Tatbestände durchweg akzeptiert wurden. Letzteres beruhte nicht nur auf interessenbedingten Gegenargumenten und teilweise erforderlichem Perspektivenwechsel, sondern ebenso auf unzureichender empirischer Absicherung und methodi-

98 Analog dürfte die Zahl der genuine Klimaforschung betreibenden Wissenschaftler, je nach Zugehörigkeitskriterien und umgerechnet in Vollzeit-Äquivalente, um 1900 50 bis 100, um 1950 100 bis 200 und um 2000 5.000 bis 20.000 betragen haben.

99 So konstatiert z.B. der Bundesbericht Forschung 2004 (BMBF 2004:242): „Nach Auslaufen der eher auf Grundlagenwissen ausgerichteten Programme zu Atmosphäre und Klimasystem Ende 2004 bzw. 2005 plant das BMBF in diesem Projektförderbereich eine verstärkte Fokussierung auf handlungs- und umsetzungsorientierte Maßnahmen mit Beiträgen für Konzepte einer Nachhaltigen Entwicklung.“

100 So hält Weart (2005, *The Modern Temperature Trend*: 9) für klimawissenschaftliche Publikationen fest: „The few pages of text and numbers were the visible tip of a prodigious unseen volume of work. Many thousands of people in many countries had spent most of their working lives measuring the weather. Thousands more had devoted themselves to organizing and administering the programs, improving the instruments, standardizing the data, and maintaining the records in archives. In geophysics not much came easily. One simple sentence (like ‚last year was the warmest year on record‘) might be the distillation of the labors of a multi-generational global community. And it still had to be interpreted.“

101 „Between 1965 and 1995 the number of articles published per year in atmospheric science journals tripled (Geerts 1999). Focusing more narrowly, Stanhill (2001) found that the climate change science literature grew approximately exponentially with a doubling time of 11 years for the period 1951 to 1997. Furthermore, 95% of all the climate change science literature since 1834 was published after 1951. Because science is cumulative, this represents considerable growth in the knowledge of climate processes and in the complexity of climate research. An important example of this is the additional physics incorporated in climate models over the last several decades.“ (IPCC 2007a:98)

schen Schwächen von Messverfahren und Klimamodellen, und teils auch auf ihrer gerade erst möglichen empirischen Beobachtbarkeit und Prüfbarkeit. Belege hierfür sind eben ein durch Treibhausgasemissionen, aber auch durch Veränderungen der Landnutzung anthropogen verursachter Temperaturanstieg, ein zunehmendes Abschmelzen von Gletschern und des nördlichen Polar- und Grönlandeises, ein Anstieg der Meeresspiegel, im Mittel verstärkte Niederschläge, die Existenz abrupten Klimawandels, ein weitgehend hinreichendes Verständnis der Entstehung und des Verlaufs der Eiszeiten, und das Klima als ein von Rückkopplungseffekten geprägtes, nur begrenzt prognostizierbares interaktives System vielfältiger sich wechselseitig beeinflussender Prozesse in Atmosphäre, Hydrosphäre, Kryosphäre, Pedosphäre, Lithosphäre und Biosphäre; dabei bedarf es zur eindeutigen (Er)klärung dieser Prozesse und ihrer Klimawirkungen der Vielfalt und Kombination von Untersuchungsmethoden wie z.B. Multi-Proxy Rekonstruktionen, Ensemble-Simulationen oder systematische Modellvergleiche.

Grundsätzlich geht es in Klimaforschung und Klimawissenschaft um die Beschreibung und (kausale) theoretische Erklärung von Klima(phänomenen) durch das Zusammenspiel der es/sie bestimmenden Einflussgrößen einschließlich der Wechselwirkungen der aus ihnen resultierenden Prozesse und Strukturen, wobei die Untersuchung und das Verständnis eines anthropogen verursachten Klimawandels in den letzten Jahrzehnten einen Fokus ihrer Arbeiten bildet. Untersucht wird dabei letztlich ein (singuläres) Objekt, im Wesentlichen die Oberfläche des Planeten Erde mit all ihren Sphären (Atmosphäre, Hydrosphäre, Kryosphäre, Pedosphäre, Lithosphäre, Biosphäre), in Bezug auf das (wesentliche Merkmale von ihm konzeptionell zusammenführende) Konstrukt Klima in all seinen hierfür bedeutsamen Facetten, wobei das Klima nicht experimentell im Labor untersucht und getestet, sondern allenfalls in Klimamodellen simuliert werden kann. Dazu werden die unterschiedlichen verfügbaren fachspezifischen Theorien problemorientiert im Hinblick auf den Orientierungsrahmen (anthropogener) Klimawandel kombiniert, um Klimaphänomene und - (wandel)prozesse beschreiben, erklären, rekonstruieren und simulieren zu können. Hierzu sind außerdem viele nicht als Klimatheorien einzustufende und deren Kern nicht berührende, aber der Klimawissenschaft als Fach zurechenbare Hilfstheorien, im Wesentlichen Messtheorien, – wie z.B. analog in der Hochenergiephysik – notwendig, die die benötigten und angewandten Untersuchungsmittel, -methoden und -techniken einsetzbar machen wie z.B. die Analyse von Warven, Baumringen, Eiskernen, historischen Aufzeichnungen, Satellitentechnik, Sensoren.

Wenn man nun die Unterscheidung von Disziplinen, Fächern und wissenschaftlichen Spezialgebieten beachtet und bei der Klimaforschung in Rechnung stellt, dass sie (heute) stark auf ein praktisches (gesellschaftliches) Problem, nämlich anthropogen verursachten Klimawandel ausgerichtet ist, dann handelt es sich bei ihr zunächst einmal um eine durch soziale Relevanzkriterien geprägte problemorientierte multidisziplinäre Forschung. Für die Untersuchung und Erklärung von Klima(wandel) sind dabei vorrangig die Geowissenschaften im umfassenden Sinne, und damit die Fächer Meteorologie, Ozeanografie, Glaziologie, Geologie, einschließlich Vulkanologie und Erdbebenkunde, Geografie und Pedologie zuständig. Aus disziplinärer Perspektive entstammen die für diese Fächer konstitutiven Grundtheorien vorrangig der Physik, der Chemie, sowie außerdem der Biologie und (als formaler Querschnittsdisziplin) der Mathematik.

Dabei werden die im Einzelnen in Klimamodellen und -theoremen zum Tragen kommenden speziellen Theorien in denjenigen wissenschaftlichen Teil- und Spezialgebieten entwickelt, angewandt und überprüft, die die jeweiligen Klimaphänomene und -prozesse mithilfe dieser häufig als Anwendungsgrundlagentheorien klassifizierbaren Theorien und Modelle zu beschreiben und zu erklären

suchen. Als maßgebliche übergeordnete¹⁰² wissenschaftliche Bereiche und Spezialgebiete mit in ihnen verankerten Theorien sind nun folgende, gemäß ihrem disziplinären Hintergrund geordnete Fachgebiete zu nennen:

- Atmosphärenphysik, Meeresphysik, Eisphysik, Geophysik, Solarphysik (und Astrophysik), deren Grundtheorien insbesondere folgenden theoriebasierten Bereichen der Physik (und Chemie) entstammen:
- Photophysik und Photochemie (inklusive ihrer Kopplung), einschließlich der Messung und Erklärung von bei bestimmten Wellenlängen absorbiertes und anderen (größeren) Wellenlängen wieder emittierter Strahlung sowie der sich hieraus ergebenden Energiebilanz und strahlungsbedingten Erwärmung
- Mikrophysik, die die lokale (mikroskopische) Dynamik aller physikalisch-chemischen Vorgänge, etwa bei und an Aerosolen oder in Wolken beschreibt,
- Strömungsphysik und Thermodynamik, die z.B. die Ozeanzirkulation oder die atmosphärische Dynamik und Zirkulation erklären, teils beschrieben durch atmosphärische Wellen und durch Makroaustauschprozesse zwischen (synoptischen) Bereichen der Atmosphäre, wobei sie diese an anderer Stelle beeinflussende Prozesse, z.B. die Anreicherung von Treibhausgasen in der Troposphäre, berücksichtigen,
- Festkörperphysik, die etwa die in Kryosphäre und Lithosphäre stattfindenden Prozesse zu erklären und zu modellieren versucht,
- Physik und Chemie der Grenzschichten und Austauschprozesse zwischen Atmo-, Hydro-, Kryo-, Litho- und Biosphäre und zwischen verschiedenen Schichten einer Sphäre, z.B. Troposphäre, Stratosphäre, Mesosphäre, Thermosphäre,
- basale theoretische Physik wie Mechanik, Elektrodynamik und Optik;
- atmosphärische Chemie, Meereschemie, Eischemie, Bodenchemie, Geochemie, Biogeochemie, Chemie der Stoffkreisläufe, deren Grundtheorien insbesondere folgenden theoriebasierten Bereichen der Chemie (und Physik) entstammen:
- physikalische Chemie, die chemische Zusammensetzung, Reaktionsmuster und -raten der an den atmosphärischen oder marinen Prozessen beteiligten Stofffamilien und Elemente beschreibt und erklärt,
- basale theoretische Chemie wie chemische Kinetik, die Thermodynamik chemischer Reaktionen und das chemische Gleichgewicht, Chemie der Redoxvorgänge, Chemie der Säuren und Basen,
- Chemie bestimmter Stoffgruppen, insbesondere der Wasserstoff-, Kohlenstoff-, Stickstoff- und Schwefelverbindungen,
- Analysen und Theorien biogeochemischer (Stoff-)Kreisläufe, vor allem des Kohlenstoffkreislaufs, die relevante physikalisch-dynamische, biogeochemische, photochemische und biologische Bedingungsbeziehungen und außerdem geologische, geografische und pedologische Rahmenbedingungen quantitativ erfassende und bilanzierende¹⁰³ Erklärungskomponenten umfassen (müssen);

102 Es geht hier um generelle Theoriedomänen und nicht um ganz bestimmte Phänomene behandelnde Spezialtheorien wie z.B. Wolken-Aerosol-Wechselwirkungen, Treibhauseffekte von Stickoxiden oder FCKWs, Kohlendioxidspeicherung in tropischen Wäldern oder ENSO-Telekonnektionen.

103 Hierbei geht es primär um die Erfassung und Bilanzierung von Größen, die signifikante klimatische Effekte haben, wie z.B. globaler und regionaler Umfang der Bewaldung und deren Veränderung, Ausmaß und Konzentration der bebauten Flächen, Größe von Plankton- oder Walpopulationen, Umfang anthropogener CO₂- oder Methanemissionen.

- Biologie der Vegetation, Biologie der Landnutzung, Bodenbiologie, Meeresbiologie, Populationsbiologie, die insofern interessieren, als sie Aussagen über die (beobachtbare und messbare) Größenordnung von biologischen Emissions- und Absorptionsprozessen unterschiedlicher klimarelevanter Substanzen wie Treibhausgase sowie über deren Einfluss auf und die diesbezügliche Wirkung von (klimarelevanten) physikalischen Größen wie Temperatur, Druck, Konzentration, Feuchtigkeit erlauben und die hierfür verantwortlichen biologischen Prozesse (ohne deren genauere Kenntnis) in nach Möglichkeit einfachen Input-Output-Modulen in Klimamodellen berücksichtigt werden können und müssen;
- im Rahmen von Erdsystemanalysen anthropogene Treibhausgasemissionen und deren Veränderungen berechnende ökonomische (und sozialwissenschaftliche) Modelle und Theorien, die nicht als genuine Klimatheorien einzustufen sind, aber dem Bereich der Klimawissenschaft als umfassendes Fach zugeordnet werden können;
- schließlich – als formale Querschnittsdisziplinen und Theorien – angewandte Mathematik, Theorie der Differenzialgleichungen, Chaostheorie, Informatik und Kybernetik, die zunächst die aus diesen unterschiedlichen (physikalischen und chemischen) Prozessen jeweils resultierenden (atmosphärischen und hydrosphärischen) Entwicklungsdynamiken abbilden und darüber hinaus wirksame (nichtlineare) Wechselwirkungen zwischen diesen verschiedenartigen Prozessen sowie allgemeine, im Prinzip relevante Interaktionsdynamiken formal rekonstruieren und modellieren.¹⁰⁴

Dabei ist in dieser Auflistung auf eine gewisse Vorrangigkeit physikalischer Theorien in der Klimaforschung hinzuweisen, die nicht nur historisch, sondern auch sachlich erklärbar ist, als sie – jenseits formal integrierender Modelle – eher übergreifend nutzbare und zugleich substanziell gehaltvolle Konzepte offerieren¹⁰⁵, wie insbesondere das im 1. IPCC-Bericht (FAR) propagierte und mittlerweile vorherrschende Konzept des Strahlungsantriebs.¹⁰⁶

Deutlich wird, dass die jeweiligen (disziplinär fundierten naturwissenschaftlichen) Theorien bereichs- und fallspezifisch genutzt und kombiniert werden, um in entsprechende (fachspezifische) Erklärungsmodelle einzugehen, die vielfach primär mit der (umfangreichen) Ermittlung, Dokumentation und Bilanzierung einer Vielzahl von Daten verbunden sind, um die Größe und Veränderung von Phänomenen zu erfassen und zu analysieren, wie z.B. Veränderungen der Landnutzung, der Waldbedeckung, der Gletscherausdehnung, der Solarstrahlung, ozeanischer Säuregrade oder Gehalte an Eisen oder Kohlendioxid, von Aerosolmengen durch Vulkanausbrüche, oder Veränderungen in Stoffkreisläufen.

104 Insofern diese formalen (mathematischen) Theorien und Verfahren in Klimatheorien eine konstitutive Rolle spielen, sind sie – anders als genuine Mess- und Gerätetheorien – hier pauschal mit aufgeführt.

105 „Die Physik verfügt in der Modellierungspraxis über den Status einer Leitdisziplin. Dies hat zunächst methodische Gründe. Die Berechnung der Modelle erfolgt formal... über die Lösung mathematischer Differenzialgleichungen. Wegen ihrer mathematischen Grundlagen wird die Physik daher von den Befragten oft als Kerndisziplin der Klimaforschung bezeichnet... Für die Leitfunktion der Physik gibt es auch inhaltliche Gründe. Ursprünglich war die Meteorologie die Herkunfts- und zugleich die Leitdisziplin der Klimaforschung. Viele der untersuchten Klimaphänomene sind jedoch physikalische Erscheinungen, von der Verdunstung über die Meeresströmung bis zur Klimaerwärmung. Physikalische Erklärungsmuster dominierten deshalb zunehmend die Modelle der Klimaforschung.“ (Röbbecke et al. 2004:56)

106 „Das Energiebilanzmodell ist ein entscheidendes Erkenntniswerkzeug im Instrumentarium der Klimaforschung, vor allem, weil es – bestätigt durch die Resultate der aufwendigen realitätsnahen Klimamodelle – die für die Genese des globalen Klimas wesentlichen Prozesse beschreibt: es ist somit ein zulässiges konzeptionelles Modell, das aufgrund seiner Reduktion an Komplexität auf das Wesentliche ‚wissenschaftliches Verständnis‘ darstellt.“ (Storch et al. 1999:87)

Für das Gesamtbild des Klimawandels – im Prinzip ein komplexes (kybernetisches) Prozessmuster – ist dann die Integration von Befunden aus Paläoklimatologie, über abrupten Klimawandel, über anthropogenen Klimawandel, aus Klimaprojektionen und aus anderen die Klimawissenschaft konstituierende Forschungsbereichen notwendig und soweit möglich auf ihre Richtigkeit hin zu überprüfen. Dabei ist der regional unterschiedliche Verlauf von Klimaänderungen in Rechnung zu stellen. Entscheidend sind dabei die (problemorientierte) Verknüpfung unterschiedlicher klimarelevanter Teiltheorien *und* verschiedener Forschungsmethoden bis hin zu Multi-Proxy Rekonstruktionen und Ensemble-Simulationen. So bedarf es zum besseren Verständnis von Klimageschichte und Kryosphäre beispielsweise Eiskernbohrungen, der Aufbewahrung und (spektroskopischen) Analyse von Eiskernen, Antarktis-Stationen, Satelliten- und Unterwassermessungen des arktischen Polareises, der Abgleichung mit anderweitig gewonnenen Proxydaten, der Modellierung der Kryosphäre und der Untersuchung von Rückkopplungen in der Kryosphäre sowie der Austauschprozesse zwischen Atmosphäre, Ozean, Land und (See-)Eis.

Im Ergebnis bestätigt die (Geschichte der) Klimaforschung die Aufrechterhaltung und Dominanz disziplinär bestimmter Theorien, und deren problemorientierte (finalisierte) Verknüpfbarkeit, Substantiierung und Verfeinerung, die mehr bedeutet als bloße Theorieanwendung, und die zugleich zur Fortentwicklung und Differenzierung (grundlagenorientierter) wissenschaftlicher Forschung gemäß deren Normen beiträgt.

Ganz generell geht es in der Klimatheorie kaum je um Einfaktor-Erklärungen, sondern um Erklärungen mithilfe der – fallspezifisch variierenden – Kombination von Einflussfaktoren. Klimatheoretische Aussagen und Ursachenzuweisungen verlangen auch von daher meist die Kombination verschiedener Forschungsmethoden und -instrumenten.

Was den Grad der Interdisziplinarität der Klimaforschung angeht, so kann von problemorientierter *Intradisziplinarität*, wo mehrere, disziplinär zumindest verwandte Fächer mit ähnlichen Forschungsfragen zusammenarbeiten, und von problemorientierter *Multidisziplinarität* gesprochen werden.

Eine solche inzwischen breit angelegte Klimaforschung weist deutliche Anzeichen einer Fachbildung, nicht jedoch einer Disziplinbildung auf. Für die Entwicklung einer eigenständigen, kognitiv und sozial ausdifferenzierten Klimaforschung (und Earth system science) war der Perspektivenwechsel hin zu einer ganzheitlichen Sicht des Klimasystems von entscheidender Bedeutung. Erst sie ermöglicht der Klimawissenschaft, (potenziell) zu einem Fach mit eigenen Journalen, Forschungsprogrammen und Ausbildungsmodulen zu werden. Aber nur weil die Klimaforschung zugleich prioritär mit dem praktischen (gesellschaftlichen) Problem anthropogen verursachten Klimawandels befasst war, kann sie wohl in der Tat zum Fach ‚Klimawissenschaft‘ werden. Ohne dieses wäre sie wohl sicher weit weniger expandiert und wahrscheinlich ein intra- und multidisziplinär geprägtes Forschungsfeld von Meteorologen, Ozeanografen, Glaziologen etc. geblieben; denn ihre allgemeineren Forschungsfragen konnten im Prinzip bereits zuvor von diesen Fächern und relevanten Subdisziplinen wie Atmosphärenphysik, atmosphärische Chemie, Hydrologie etc. behandelt werden. Es erscheint somit plausibel, dass sich die Klimaforschung mit einiger Wahrscheinlichkeit zu einem neuen Fach mit vielfältiger problemorientierter Forschung in einem gemeinsamen übergeordneten Bezugsrahmen entwickeln wird.

Wenn sich in der Klimaforschung jenseits multidisziplinärer problemorientierter Forschung und jenseits einer als (Teil-)Fach firmierenden physikalischen Subdisziplin auf kognitiver Ebene Disziplinbildungsprozesse ausmachen lassen sollen, dann müsste sich wenn schon kein grundlegendes Paradigma so doch die Gestalt eines theoretischen Integrationsniveaus abzeichnen. Dieses kann nach Lage der Dinge nur eine Theorie der Interaktionsdynamik sein, die die unterschiedlichen Rückkopplungen und Austauschprozesse zwischen den Subsystemen und Grundprozessen des Klimasystems zu beschreiben und erklären in der Lage ist und auf die Erdsystemmodelle bezeichnenderweise auf allerdings hochabstrakter Ebene abzielen. Hier sind jedoch die systematischen methodischen und epistemischen Grenzen der Generalisierbarkeit und Theoretisierbarkeit von im

Einzelfall durchaus rekonstruierbaren Interaktionsdynamiken in Rechnung zu stellen, die eine solche Theorie sehr unwahrscheinlich machen. Von daher sind in der Klimaforschung weder ein grundlegendes Paradigma noch ein theoretisches Integrationsniveau erkennbar, das sie zu einer Disziplin – mit einem genuinen Theoriegerüst samt prognostischen (und technisch-instrumentellen) Kompetenzen – werden lassen könnte.¹⁰⁷

Im Vergleich mit ihrem vorrangigen Mutterfach Meteorologie und mit ihrer primären Basisdisziplin Geophysik weisen soziale und kognitive Struktur- und Prozessmuster der Klimaforschung (und Klimawissenschaft) einerseits viele Parallelen und andererseits eine stärkere Problemorientierung und mehr Intra- und Multidisziplinarität auf. Im Vergleich mit der Umweltforschung als Prototyp problemorientierter multidisziplinärer Forschung und mit der Medizin als einem entlang einem praktischen Problem organisierten Fach weisen sie bei gleichfalls vielen parallelen Mustern demgegenüber einen klareren, konzeptionell integrierenden gemeinsamen Bezugsrahmen, einen stärkeren (spezifischeren) Problemfokus und eine höhere Kohärenz auf.

Zusammenfassend sei im Hinblick auf die Struktur, konzeptionelle Verankerung und Rolle wissenschaftlichen Wissens in der Klimaforschung noch einmal festgehalten:

1. Erklären und Verstehen des Klimas und Klimawandels der Erde betrifft einen einzelnen spezifischen Planeten. Darum handelt es sich bei der Klimaforschung letztlich um die Analyse eines konkreten Falls, dessen Ergebnisse nicht unbedingt verallgemeinerbar zu sein brauchen.
2. Insofern das Klima der Erde nicht experimentell im Labor untersucht und getestet werden kann und insofern der Klimawandel für die globale Gesellschaft letztlich ein handfestes praktisches Problem darstellt, sollte Klimaforschung im Ergebnis zunächst einmal auf eine durch soziale Relevanzkriterien geprägte problemorientierte multidisziplinäre Forschung hinauslaufen.
3. Von daher ist die Klimaforschung grundsätzlich finalisierbar (vgl. Böhme et al. 1978, Krohn/Daele 1998).
4. Aufgrund der in vielerlei Hinsicht (zunächst einmal) unzureichenden Kenntnisse und Erklärungen von Klimaprozessen geht es in der Klimaforschung trotz aller historisch jeweils bestehenden interessenbedingten und konzeptionellen Befangenheiten um wissenschaftlichen, Wahrheit beanspruchenden Erkenntnisgewinn.
5. Ein detailliertes Verständnis und eine Geltung beanspruchen könnende Entscheidung über kontroverse Erklärungen verlangt angesichts der Komplexität des Klimas mit seinen vielfältigen Phänomenen und sich überlagernden Bestimmungsgrößen die Bestimmung von Unmengen von Daten und komplexe Berechnungen, die nur bei Verfügbarkeit entsprechender Messverfahren und Computerkapazitäten und bei Existenz einer umfangreichen Forschungsinfrastruktur und -kooperation möglich sind.
6. Mit zunehmendem Klimawissen sollte die Eindeutigkeit von Befunden und Erklärungen jedoch mit der Zeit zunehmen, sodass über deren Geltung entschieden und eine damit verbundene Schließung von Kontroversen möglich sein sollte.
7. Konkret handelt es sich bei Klimamodellen und -theorien um die (modulare, meist auf bestimmte Phänomene bezogene) Verknüpfung von (vorrangig kausal erklärenden physikalischen und chemischen) Theorien aus verschiedenen Subdisziplinen, die in den Geowissenschaften (und der Biologie) genutzt werden.

107 Falls allerdings ein weit gefasster, eher schwacher Begriff von wissenschaftlicher Theorie zugrunde gelegt wird, wie er etwa in der Hermeneutik der Geisteswissenschaften oder in systemtheoretischen Konzeptualisierungen aufscheint, kann ab Beginn dieses Jahrhunderts möglicherweise dennoch von Disziplinbildung in der Klimaforschung gesprochen werden.

8. Während im Entstehungszusammenhang soziale Relevanzkriterien die Ausrichtung der Klimaforschung mitbestimmen und im Verwendungszusammenhang ihre Ergebnisse beim Transfer klimapolitisch eingefärbt und übersetzt werden, hat die (Klima-)Wissenschaft letztendlich über den Geltungszusammenhang ihrer Erkenntnisse zu befinden.
9. Gerade im Hinblick auf ihre auch außerwissenschaftliche Relevanz müssen die Ergebnisse der Klimaforschung innerwissenschaftlich allgemein anerkannt sein und durch respektierte Grenzorganisationen wie das IPCC in die Klimapolitik transferiert werden (vgl. Agrawala 1997, 1998a, 1998b, Alfsen/Skodvin 1998, Böhmer-Christiansen 1993, 1994a, 1994b, Franz 1997, Guston 2000, 2001, Poloni 2006).

Vor dem Hintergrund der skizzierten Entwicklungsphasen der Klimaforschung mit erst ab etwa 1970 für sie maßgebliche Bedeutung erlangenden Grenzorganisationen und Assessments verwundert es nicht, wenn sich ähnlich wie in der Ozonforschung im Ergebnis wiederum zwei unterschiedliche Dynamiken in der Entwicklung beider Forschungsfelder ausmachen lassen, die grob ihre ersten drei bis ca. 1970 währenden und ihre letzten drei danach beginnenden Phasen abdecken.

Für die erste Entwicklungsdynamik der Klimaforschung ist kennzeichnend, dass eine kognitiv und sozial ausdifferenzierte Klimaforschung jenseits der traditionellen Klimatologie noch gar nicht existierte, genuin klimawissenschaftliche Erkenntnisse eher Abfallprodukte einer sich ausweitenden meteorologischen Forschung waren und einem globalen Klimakonzept erst in den 1960er Jahren der Durchbruch gelang. Die vorhandenen und vor allem im Hinblick auf bessere Wetterprognosen neu entwickelten Untersuchungsinstrumente und -verfahren lieferten noch vergleichsweise unzureichende Messdaten, sodass die verfügbare empirische Datenbasis nicht ausreichend war, um über die Geltung unterschiedlicher, teils spekulativer Theorien und Modelle entscheiden zu können. Infolgedessen weist diese Entwicklungsdynamik einen eher indirekten und teils zufälligen Charakter auf. Bei geringem gesellschaftlichen Interesse wurde sie durch eigens für sie vorgesehene Fördermittel nur wenig gestützt. Vielmehr bereiteten ihr auf der einen Seite die Etablierung, Expansion und Forschungsergebnisse anderer Fächer, insbesondere der Meteorologie, und auf der anderen Seite manche wissenschaftliche Außenseiter vor allem indirekt den Boden. Es war weniger Abwehr als viel mehr Nichtbeachtung durch andere Interessen verfolgende wissenschaftliche oder nicht-wissenschaftliche Akteure, die die Entwicklung einer Eigendynamik der Klimaforschung trotz der existierenden kognitiven Vernetzung des jeweils verfügbaren klimarelevanten Wissens verhinderte. Hier bahnte sich in den 1960er Jahren mit dem Nachweis eines kontinuierlichen Anstiegs der atmosphärischen CO₂-Konzentration (Keeling) und der Entwicklung komplexerer und realistischerer computerbasierter Klimamodelle (Manabe u.a.) in Verbindung mit der zunehmenden gesellschaftlichen Entfaltung des ökologischen Diskurses vor allem in westlichen Industrieländern ein allmählicher Umschwung an.

Dieser mündete in die zweite, seit den 1970er Jahren wirksame Entwicklungsdynamik der Klimaforschung, der ein nunmehr global definiertes Klimakonzept zugrunde lag und die aufgrund des positiven, sich wechselseitig verstärkenden Zusammenspiels der verschiedenen, auf unterschiedlichen Ebenen angesiedelten Einflussfaktoren im Laufe der letzten drei Jahrzehnte eine sehr viel stärkere wissenschaftliche Eigendynamik ausbildete. Dabei war die Verstärkerwirkung einer expandierenden Forschungsförderung, eines öffentlichen Klimadiskurses und schließlich auch innerhalb der Wissenschaft einer teils echten Besorgnis und eines forschungspolitischen Engagements vieler Klimaforscher in Bezug auf das Klimaproblem von entscheidender Bedeutung, auch wenn sie die Klimaforschung in ihren inhaltlichen Aussagen kaum beeinflusste. So wäre die Vervielfachung der jährlichen Fördermittel von weltweit geschätzt 40 Mio. € um 1970 über 1 Mrd. € um 1990 auf 4 Mrd. € bis 2000 ohne das Interesse von Politikern an unzweideutigen wissenschaftlichen Befunden in konfliktbeladenen, weiterreichende Aktionen und Regulierungen erfordernden Entscheidungslagen wohl kaum zustande gekommen. Und ohne die Finanzierung und Entwicklung ent-

sprechender Rechenzentren, Computer und Simulationsmodelle, Messplattformen und Messinstrumente wären realitätsnahe Klimamodelle und Klimaprojektionen, der Nachweis von Konzentrationsveränderungen atmosphärischer Spurengase oder die empirisch untermauerte Abschätzung der verschiedenen veränderten (für die Erwärmung verantwortlichen) Strahlungsantriebe nicht möglich gewesen. Wissenschaftsintern war die wachsende Ausdifferenzierung und Institutionalisierung einer eigenständigen Klimaforschung von zentraler Bedeutung, die mit der Bildung einer zwar segmentierten, aber durch ein gemeinsames Erkenntnisinteresse und den übergreifenden Problembezug des Klimawandels verbundenen wissenschaftlichen Community und Problemgemeinschaft mit entsprechender kognitiver Vernetzung einherging, deren Mitglieder sich zwar weiterhin in ihren jeweiligen Herkunftsfächern verankert, aber auch zunehmend als Klimawissenschaftler fühlten. Dabei wären ohne das kooperative Zusammenwirken vieler Forschungs- und Messinstitutionen, unterschiedlicher Analyseformen (theoretische Erklärung, Ballon-, satellitengestützte und In-situ-Messungen, Gewinnung von Proxydaten, Klimasimulationen) und verschiedener Disziplinen und Fächer (im Wesentlichen Teilgebiete der Physik, Chemie, Mathematik, Biologie sowie Meteorologie, Ozeanografie, Geologie, Bodenkunde, Glaziologie, Paläoklimatologie) die in der letzten Dekaden entwickelten, komplexeren, systemisch angelegten Erklärungen des Klima(wandel)s nicht möglich gewesen. Im Ergebnis basierte die Entwicklungsdynamik der Klimaforschung nach 1970 vor allem auf dem positiven Zusammenspiel ihrer verschiedenen Bestimmungsfaktoren auf kognitiver und sozialer Ebene, das bis nach 2000 eine stark innerwissenschaftlich geprägte Eigendynamik im Sinne einer kontinuierlichen Ausweitung, Vertiefung und Aussagenvalidierung der Klimaforschung induzierte. Insofern die Klimaforschung sich dabei vorrangig mit dem anthropogen verursachten globalen Klimawandel als einem praktischen gesellschaftlichen Problem befasste, bildeten die inner- und außerwissenschaftliche Besorgnis um eine weltweite Erwärmung und deren Folgen und die daraus resultierende Bereitschaft zu einer enorm expandierenden Forschungsförderung und der Konzipierung und Durchführung diesbezüglicher Forschungsprogramme und Kampagnen maßgebliche Voraussetzungen und Schubkräfte dieser Entwicklungsdynamik. Mit deutlich gestiegenem Wissensstand und im Prinzip ausreichendem Verständnis in Bezug auf den Klimawandel verschieben sich die Prioritäten maßgeblicher wissenschaftsexterner Akteure nach 2000 zugunsten einer verstärkten Entwicklung von Klimatechnologien und vermehrter Klimafolgenforschung, was dementsprechend auch die Entwicklungsdynamik der Klimaforschung im weiteren Sinne in Richtung der Erarbeitung technischer Problemlösungen verändert.

Dass sich die Entwicklung der Klimaforschung aus wissenschaftsinterner Perspektive – trotz lange andauernder Kontroversen und der Zurückweisung von auf signifikanten Indizien basierenden Hypothesen eines anthropogen verursachten Temperaturanstiegs in den betroffenen Fachgemeinschaften¹⁰⁸ – in ihrem Gesamtergebnis letztlich als wissenschaftliche Erfolgsgeschichte einer zwar widersprüchlichen, im Ergebnis jedoch kumulativ ertragreichen problemorientierten Forschung interpretieren lässt¹⁰⁹, beruht auch hier im Wesentlichen auf dem – vor allem seit den 1970er Jahren

108 Der Geltungszusammenhang von Klimatheorien blieb daher meist umstritten und die durchgängige Anerkennung ihrer Gültigkeit erfolgte oft erst in diesem Jahrhundert.

109 Bei Berücksichtigung der epistemischen Problematik von Simulationen und modell- und theoriehaft erzeugten empirischen Daten gilt diese Aussage nur für die Klimaforschung im engeren Sinne, wie sie etwa in der Working Group I des IPCC (The (Physical) Science Basis) präsentiert wird, und (noch) nicht für die Klimafolgenforschung, die Entwicklung von Klimatechnologien und die Analyse von Anpassungs- und Vermeidungsstrategien, wie sie etwa in den Assessment Reports der Working Groups II und III (‘Impacts, Adaptation, and Vulnerability’ und ‘Mitigation of Climate Change’) dargestellt werden. Deren Ergebnisse, Formulierungen und methodische Schwachpunkte, wie sie etwa in der Behandlung von Querschnittsthemen (cross-cutting themes) und der hierbei äußerst fragwürdigen Trennung von Fakten und Werten zum Ausdruck kommen (vgl. Healy 2005), ihre noch unzureichende konzeptionelle und methodologische Absicherung und ihr erst relativ kurzes wissenschaftliches Leben lassen jedenfalls bislang noch keine solche weitreichende positive Beurteilung zu.

zu beobachtenden – teils situativ bestimmten (kontingenten) Zusammenspiel positiver Einflussfaktoren bei zunehmender Abwesenheit restringierender Momente, das eine selbsttragende Eigendynamik in der Entwicklung der Klimaforschung induzierte. Dabei waren wissenschaftsexterne Einflüsse auf die inhaltlichen Ergebnisse der Klimaforschung im Sinne sie ermöglichender Rahmenbedingungen, nicht aber im Sinne sie substanziiell mitgestaltender Einwirkung von Bedeutung. Abbildung 1 versucht diese Wissenschaftsdynamik im Hinblick auf ihre innerwissenschaftlichen (sozialen und psychologischen), nachfolgend aufgelisteten Elemente anzureißen:

- ein genuines Interesse der Mehrzahl der Klimaforscher an der wissenschaftlichen Erklärung des Klimasystems,
- ein zeitgeistig geprägt verstärktes Interesse an problemorientierter, verschiedene Theorien kombinierender Forschung,
- ein langer Forschungszeithorizont,
- die Herausbildung eines interessanten problemorientierten und zugleich Reputation versprechenden, sowohl neue Grundlagenkenntnisse versprechenden als auch teilweise experimentelle Designs ermöglichenden Forschungsfeldes,
- die erfolgreiche (kognitiv validierte) Schließung von Kontroversen,
- ein mehr spielerischer als verbissener Umgang mit eigenen und alternativen Erklärungsmodellen,
- die außer auf Profilierungs- und Konkurrenzinteresse auf genuinem Erkenntnisinteresse basierende vermehrte Beteiligung an Klimamodell- und anderen Vergleichsprojekten,
- eine hinreichende Trennung von Forschung und Review bei gleichzeitiger organisatorischer und personeller Vernetzung¹¹⁰
- vergleichsweise wenige, eine Forschung entlang dem Ethos der Merton'schen Normen unterminierende vested interests der Klimaforscher,
- das Interesse an wissenschaftlicher Kooperation etwa im WCRP aus genuinen Erkenntnisgründen,
- in diesem Zusammenhang die bewusste und gezielte Einbeziehung von und ein förderlicher Umgang mit Klimaforschern aus Entwicklungsländern (vgl. zu den damit verbundenen Problemen Agrawala 1997, Lahsen 2002),
- das Interesse von Klimaforschern und Klimapolitikern an wissenschaftlich konsensfähigen und überzeugenden Assessments, die durch geeignete Peer Review Prozeduren abgesichert sind und in der Klimapolitik auf Resonanz stoßen und akzeptiert werden (vgl. Agrawala 1997, Bechmann/Beck 2003, Böhmer-Christiansen 1994a, 1994b, Conrad 2009b, Dessler/Parson 2006, Moss 2000, Poloni 2006, Skodvin 1999),
- in diesem Kontext viel (unbezahltes) Engagement und Aufwand für die aufwändigen Review-Prozesse des IPCC,
- die gelungene Abgrenzung gegenüber klimapolitischen Außeneinflüssen durch das IPCC,
- das situative Zusammenwirken von Erkenntnisinteressen, Förderinteressen und wissenschaftlichen Entrepreneuren,
- eine infolge des wissenschafts- und klimapolitischen Engagements renommierter Klimaforscher verstärkte Forschungsförderung,
- und schließlich echtes (moralisches) Interesse an einer Begrenzung des anthropogen verursachten Klimawandels.

110 So sind häufig dieselben Schlüsselpersonen (key persons) im IPCC und im WCRP engagiert, wodurch sie auch die Forschung(srichtung) in ihrem Sinne beeinflussen können.

Herausragendes Merkmal der Klimaforschung ist die mehrfach skizzierte zentrale Stellung von Klimamodellen und -simulationen, die auf ‚praktischer‘ Mathematik (computational science) basieren, auf die weltweit größten Rechnerkapazitäten angewiesen sind und scientific computing zunehmend zur Schlüsselressource des 21. Jahrhunderts machen, sodass im Ergebnis Klimamodellierung als paradigmatische epistemische Kultur der Simulation eingestuft werden kann (vgl. Edwards 2000, 2007, Elzinga 1996, 1997, Gramelsberger 2007, Miller 2004, 2005).

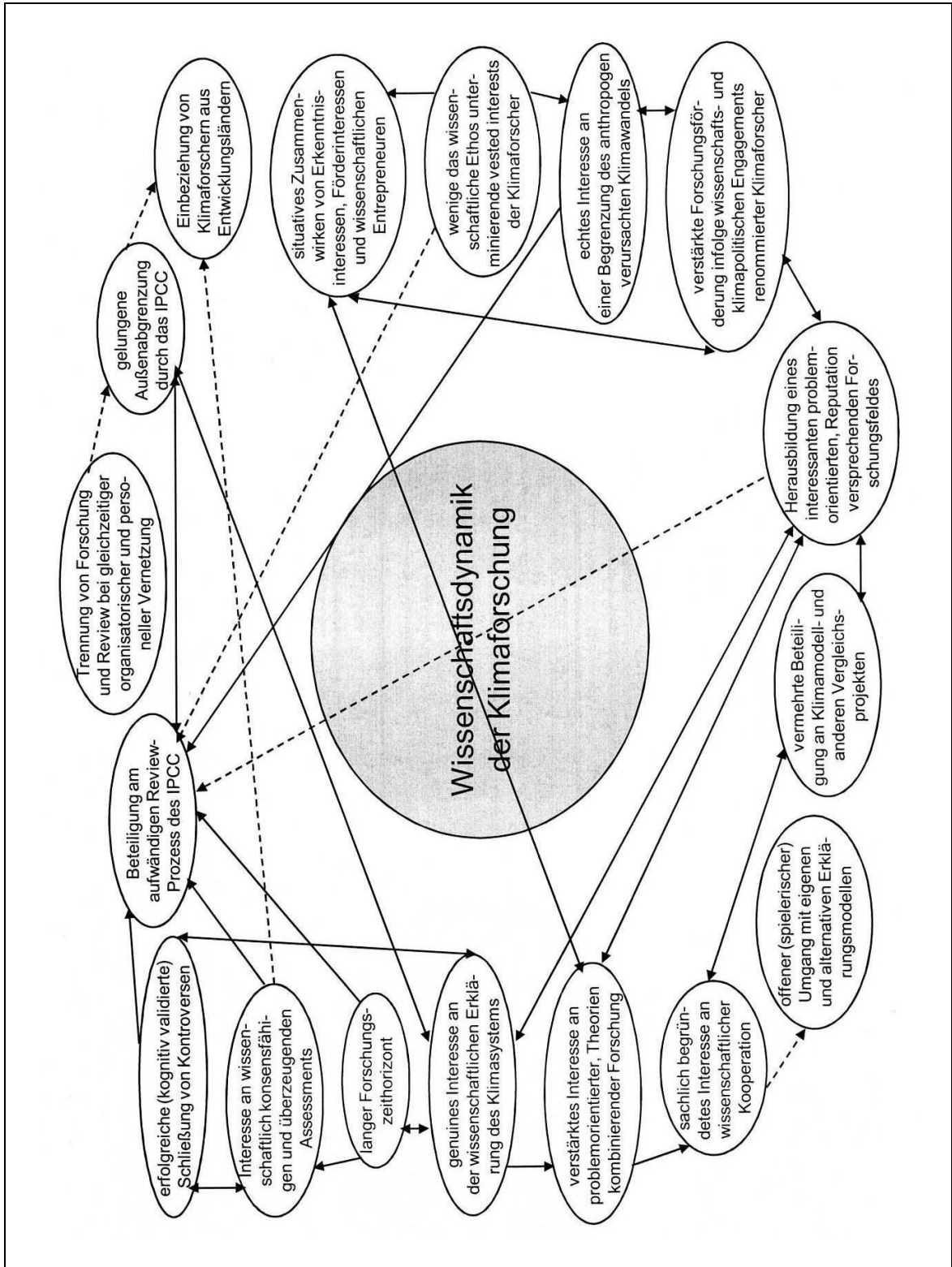


Abb. 4.1: Wissenschaftsdynamik: innerwissenschaftliche soziale und psychologische Determinanten

Ob hierbei die über die Kopplung in Modell-Modulen hinausgehende integrierte Analyse von Klimaprozessen und -wandel in substanziiell aussagekräftigen Erdsystemmodellen, die auf die Interaktionsdynamik der Sphären und Komponenten des Klimasystems abzielen und ein deutlich erkennbares theoretisches Integrationsniveau aufweisen, und sich teils darüber hinaus auch um die

Modellierung und Ankopplung von ökonomischen und sozialen Systemen in eigenen Modell-Modulen bemühen, von Erfolg gekrönt sein könnte oder eine Überforderung klimabezogener Theoriebildung darstellt, ist vorläufig eine noch offene Frage. Infolge der hohen Komplexität mit vielfältigen, auf unterschiedlichen Raum- und Zeitskalen ablaufenden Kopplungen der Subsysteme Atmosphäre, Hydrosphäre, Kryosphäre, Pedosphäre, Lithosphäre und Biosphäre dürften zumindest auf der Ebene des Gesamtsystems Erde eher deskriptiv angelegte, heuristische Schemata (z.B. der Syndromansatz) gegenüber kausal orientierter Theoriebildung als Erklärungsmuster Vorrang genießen. Damit bestätigt das Beispiel der Klimaforschung und -modellierung auch, dass mit wachsender Komplexität ihres Gegenstandsbereichs (gerade in problemorientierter multidisziplinärer Forschung) ein zunehmender trade-off zwischen Vorhersagegenauigkeit und Vollständigkeit erklärender (disziplinärer) Theorien zu erwarten ist.

An in der Klimaforschung relevanten wissenschaftlichen Kontroversen, die seinerzeit aufgrund fehlender empirischer Daten, mangelnder Eindeutigkeit von Untersuchungsmethoden und jeweils vorherrschender, durch gesellschaftspolitische Interessenlagen und Ideologien teils forcierter Erklärungsperspektiven durchaus begründet waren, seien zusammenfassend am Ende dieses Kapitels aufgeführt: Klima als stationäre oder sich wandelnde (regionale) Gegebenheit (ca. 1890-1900), Eintritt eines durch Landrodung und Kultivierung verursachten Klimawandels (18. und 19. Jahrhundert), unterschiedliche Erklärungen früheren Klimawandels (ca. 1880-1950), unterschiedliche Erklärungen der Eiszeiten (ca. 1880-1975/2000)¹¹¹, Anstieg der atmosphärischen Kohlendioxidkonzentration (ca. 1900-1960), Anstieg der mittleren globalen Temperatur (ca. 1970-2000), anthropogene Ursachen des CO₂- und Temperaturanstiegs (ca. 1970-2000), der positive oder negative Netto-Strahlungsantrieb von Aerosolen (ca. 1970-2003) und der anteilige Verbleib emittierten Kohlendioxids in Ozean und Landvegetation (ca. 1970-2005).¹¹²

Mit diesen Kontroversen gingen im Allgemeinen berechtigterweise solche um die Reliabilität, Validität, Stringenz und Kontextabhängigkeit von Untersuchungsmethoden, Messdaten und Modellen (vgl. Bloomfield 1986, Dessler/Parson 2006, Edwards 1999, 2001, Gramelsberger 2007, Miller 2005, Norton/Suppe 2001, Weart 2005) einher.¹¹³

Exemplarisch angeführt seien hier die durch das Wachsen der Städte um Wetterstationen herum lokal überhöhten, als urban heat island effect bezeichneten Temperaturwerte, der durch mit den benannten methodischen Problemen behafteten MSU-Satellitenmessungen festgestellte Temperaturanstieg in der Troposphäre¹¹⁴, die trotz einer Reihe unabhängiger Rekonstruktionen verbleiben-

111 Das zweite Datum von 2000 bezieht sich auf die umfassendere, die relevanten Rückkopplungsmechanismen und Verstärkereffekte jenseits der auslösenden Milankovitch-Zyklen einbeziehende Erklärung von Eiszeiten, deren genauere historische Rekonstruktion und die Erklärung kurzfristiger Klimaschwankungen innerhalb von Glazialen und Interglazialen wie Dansgaard-Oeschger-Ereignisse und Heinrich-Ereignisse.

112 Die angegebenen Zeiträume beziehen sich auf innerwissenschaftlich signifikante kontroverse Debatten und nicht auf nur von Außenseitern gegen den vorherrschenden Mainstream vorgetragene Befunde und Positionen.

113 Hierbei können unterschiedliche disziplinäre Perspektiven und Kontexte durchaus zu gegenläufigen Begrifflichkeiten und divergierenden Urteilen über die Tragfähigkeit wissenschaftlicher Aussagen führen. Im Rahmen der Klima(folgen)forschung „a conspicuous example of such non-intersecting worldviews is the almost complete lack of cross fertilization between scientists who generate model-based scenarios of future climate behavior, and researchers who study hazards and their reduction. As one indication of this divide, these communities use the word ‚mitigation‘ in opposite senses. To the climate modeling community, mitigation means prevention of climate change through greenhouse gas emissions reduction (mitigation of *cause*). To the hazards community, mitigation means protection from climate impacts through, e.g., better land use planning or infrastructure (mitigation of *effects*).“ (Sarewitz 2004:390).

114 Hier haben systematische Anstrengungen verschiedener mit unterschiedlichen Korrekturmethode arbeitender Untersuchungsteams in den letzten Jahren deutliche Fortschritte in der Begrenzung solcher strukturbedingter Messfehler gebracht (vgl. Christy/Spencer 2005, IPCC 2007a, Mears et al. 2003, Spencer/Christie 1990, Vinnikov et al. 2006).

de erhebliche Unsicherheit über den genauen Temperaturverlauf auf der Nordhemisphäre über das letzte Jahrtausend, die über den globalen Temperaturanstieg hinaus häufig noch nicht eindeutig gesicherten Auswirkungen eines Klimawandels, wie z.B. die bislang nicht signifikant erhöhte Zahl von Hurrikanen¹¹⁵ (vgl. Stehr/Storch 2003, Storch et al. 2004), die von interessierter Seite forcierte, auf unzureichenden Peer Review und mangelnde Beachtung eigener prozeduraler Regeln abhebende Kritik an der Validität des 2. IPCC-Berichts (SAR) (vgl. Edwards/Schneider 1997, 2001), oder die durch geringfügige Fehler in Modellparametern auftreten könnenden beträchtlichen Abweichungen in (regionalen) Klimasimulationen.

Während – im Rahmen solcher Kontroversen – eine Reihe von heute nicht mehr haltbaren Positionen und Aussagen vertreten wurde, wie z.B. eine herannahende neue Eiszeit, Schwankungen der Sonnenaktivität als Hauptursache globaler Erwärmung, die hohe kurzfristige CO₂-Absorptionskapazität des Ozeans (vgl. Weart 2005), finden sich interessanterweise praktisch keine seinerzeit durchweg akzeptierten klimawissenschaftlichen Erkenntnisse, die später eindeutig zurückgenommen werden mussten. Über einen längeren Zeitraum am ehesten vom (meteorologischen bzw. geologischen) Mainstream nicht anerkannt und zunächst nur von (wissenschaftlichen) Außenseitern behauptet wurden bezeichnenderweise eine anthropogen verursachte Zunahme der atmosphärischen CO₂-Konzentration (ca. 1900-1950), ein anthropogen verursachter Temperaturanstieg (ca. 1900-1960) und die Milankovitch-Zyklen als Auslöser der Eiszeiten (ca. 1865-1965).

Was somit in der Retrospektive des Öfteren als relativ eindeutiger, früh erkannter, wenn auch erst heute hinreichend abgesicherter klimawissenschaftlicher Tatbestand erscheinen mag, war seinerzeit häufig heftig umstritten und Minderheitsmeinung.¹¹⁶ Ebenso ist jedoch die Wichtigkeit und Notwendigkeit der Unzahl spezieller (lokaler) Messdaten, Datensammlungen und klimarelevanter Aussagen hervorzuheben, z.B. über lokale Temperatur- und Niederschlagsverläufe. Sie konnten nicht nur bereits früher Anerkennung ihrer Gültigkeit für sich beanspruchen, sondern haben auch als über mehr als ein Jahrhundert zusammengetragene detaillierte Laborexperimente, Messserien und theoretische Analysen zu mehrfacher Überprüfung und dem Nachweis klimarelevanter physikalischer und chemischer Prozesse und Prinzipien beigetragen und damit den heutigen Wissensstand der Klimaforschung erst möglich gemacht.

5 Problemorientierung, organisationale Koppelung und die Rolle wissenschaftlicher Kontroversen

Wie die beiden vorangehenden Kapitel verdeutlichten, sind sowohl Ozonforschung als auch Klimaforschung dadurch gekennzeichnet, dass sie in ihren ersten drei Phasen bis ca. 1960 bzw. 1970

115 Allerdings sprechen die diesbezüglichen Indizien in jüngster Zeit immer eindeutiger dafür (vgl. IPCC 2007a), selbst wenn man die gegenwärtige Warmphase der Atlantic Multi-decadal Oscillation (AMO) in Rechnung stellt (vgl. Trenberth/Shea 2006).

116 Vor allem in Weart (2005) findet sich eine Vielzahl entsprechender Beispiele. Der jüngste IPCC-Bericht (IPCC 2007a:121) hält denn auch fest: „The history of the centuries-long effort to document and understand climate change is often complex, marked by successes and failures, and has followed a very uneven pace.“

sozial noch kaum als eigenständiges Forschungsfeld und Specialty ausdifferenziert waren und dass in diesem Zeitraum zwar stets auch eine im Zeitverlauf thematisch variierende Problemorientierung bestand, jedoch ihr Erkenntnisinteresse primär akademischer (wissenschaftliche Reputation versprechender) Natur war, das auf wissenschaftliche Grundlagen und begrenzt meteorologisch-anwendungsbezogene Fragestellungen ausgerichtet war. Dabei wurden die für (stratosphärisches) Ozon bzw. für die Erklärung von Klimaphänomenen grundlegenden (physikalischen und chemischen) Theorien sowie geeignete Messinstrumente und -verfahren und seit den 1950er Jahren mit dem Computer rechenbare, komplexere Modelle entwickelt, und die Aufzeichnung und Sammlung entsprechender Messdaten bereits international organisiert und systematisiert. Somit befassten sich Ozon- und Klimaforschung in dieser Zeit vorrangig mit genuin wissenschaftlichen Problemen.

Ihren Aufschwung und verstärkte Ausdifferenzierung in den nachfolgenden Phasen verdanken sie jedoch dem Tatbestand, dass teils bereits bekanntes, aber zunehmend gesichertes wissenschaftliches Wissen – vor allem infolge entsprechender öffentlicher Kommunikation engagierter Wissenschaftler – als gesellschaftlich bedeutsam wahrgenommen, in einem seit den 1970er Jahren bestehenden Erwartungshorizont „Globale Umwelt“ kontextualisiert und sachlich begründet als praktisches Problem von vermehrtem Hautkrebs bzw. von Temperaturanstieg und Klimawandel und dessen (negativen) Folgen interpretiert wurde. Deshalb wurden eine signifikante Ausweitung der Forschungsmittel, die Durchführung umfangreicher, international koordinierter Forschungsprogramme mit aufwändigen Messkampagnen und insbesondere in der Klimaforschung enorme Rechnerkapazitäten beanspruchenden Modellsimulationen und die gezielte Untersuchung und Beantwortung problemrelevant definierter Forschungsfragen möglich, wie z.B. die Erklärung des antarktischen Ozonlochs oder des Abschmelzens von Gletschern und arktischem Meereis. Die hierbei entstehenden Anwendungsgrundlagentheorien fußen im Allgemeinen auf physikalischen, chemischen und mathematischen, sowie teils auch auf biologischen und ökonomischen Theorien, die den oben benannten disziplinär verankerten Fachgebieten entstammen, für das wissenschaftliche Verständnis des interessierenden speziellen Phänomenbereichs jedoch zu Spezialtheorien weiterentwickelt, spezifiziert und intra- und multidisziplinär kombiniert werden, und stellen insofern um Problemzusammenhänge zentrierte finalisierte Forschung dar.

In den letzten drei Phasen der Ozon- und der Klimaforschung spielt somit die Übersetzung von praktischen in wissenschaftliche und partiell in technische Probleme, wie z.B. Analyse der Entwicklung des stratosphärischen Gehalts von Ozon und von FCKWs, genauere Bestimmung der Klimasensitivität, Entwicklung von Kohlenstoff-Sequestrierungstechnologien, als auch deren Rückübersetzung in praktische Problemlösungen eine essenzielle Rolle für deren Wachstum und Orientierung. Deshalb werden Austausch- und Abstimmungsprozesse zwischen Wissenschaft und insbesondere Klima(forschungs)politik durch die Einrichtung Glaubwürdigkeit besitzender Grenzorganisationen wie das SAP und das TEAP im Kontext des Ozonregimes, oder das IPCC und durch aufwändige, auf weltweitem Peer Review beruhende Assessments¹¹⁷ systematisch organisiert, abgesichert und institutionell verankert. Hierdurch entsteht ein gewisser sozialer Druck zugunsten relativ eindeutiger, wissenschaftlich abgesicherter und konsentierter, und zugleich problemrelevanter

117 „The 2001 IPCC assessment has probably been subjected to more review and scrutiny than any scientific report in history, and all reviews have supported its conclusions. If any bias operates on the IPCC process, it is scientists' general conservatism in evaluating new claims, which grants a massive, grave authority to the assessments' major conclusions... In sum, for all the difficulties they face, the atmospheric-science assessments of the IPCC are on balance highly credible, and highly effective. Their deliberations have maintained an impressive level of independence from political interference, despite an organizational structure that could readily have threatened such independence... The continuance of the IPCC's independence and effectiveness cannot be taken for granted, however.“ (Dessler/Parson 2006:147f)

Aussagen. Dies ist sowohl in der Ozonforschung als auch in der Klimaforschung im Vergleich mit anderen gesellschaftlichen Problemlagen und darauf bezogener Forschung und Assessments im Laufe eines sich über ein bis zwei Dekaden erstreckenden Lern- und Organisationsprozesses durchaus erfolgreich gelungen. Die erforderliche Problemorientierung von Forschungsprogrammen und Assessments wird dadurch erleichtert, dass die für die Ozonforschung und die Klimaforschung primär zuständigen Atmosphärenwissenschaften und im weiten Sinne Geowissenschaften in ihrer Grundausrichtung auf die Nutzung und Spezifizierung physikalischer, chemischer und auch biologischer Theorien zur Analyse und Erklärung konkreter (singulärer) Phänomene und Prozesse und weniger von purifizierten (idealtypischen) Objekten und Prozessen abzielen, sodass eine sozial vorgegebene Problemorientierung ihrer Forschung keinen grundsätzlichen Unterschied macht und daher leicht zu verwirklichen ist und im Allgemeinen auf keine theoretischen Resistenzen trifft. (vgl. Daele/Krohn 1975, Daele/Weingart 1975)

Vor allem in Phasen ungeklärter und kontroverser Tatbestände und Hypothesen (ca. 1970-2000) gab es (soziologisch zu erwartende) Versuche externer Einflussnahme auf wissenschaftliche Aussagen. Im Ergebnis blieben diese jedoch erfolglos bzw. auf wissenschaftsexterne Arenen und Diskurse beschränkt. Mit den praktischen Problemen des stratosphärischen Ozonabbaus und des Klimawandels, deren Folgen (z.B. vermehrter Hautkrebs, mehr Unwetterschäden) und Ursachen (z.B. FCKW-Produktion, CO₂-Emissionen bei der Nutzung fossiler Energien) verknüpfte Interessen wirken sich zwar auf die Relevanzkriterien und die sozialen Organisationsformen, nicht aber auf die inhaltlichen (theoretischen und empirischen) Aussagen dieser Forschung aus, und geben ihr somit sozioökonomische Rahmenbedingungen und soziale Zielsetzungen vor, bestimmen aber nicht über die wissenschaftliche Geltung ihrer Ergebnisse/Erkenntnisse.

Im Ergebnis dominiert in Ozon- und Klimaforschung somit eine problemorientierte (multidisziplinäre) Forschung, die in der für solche Forschung typischen Art und Weise auf ein Forschungsfeld und auf Problemzusammenhänge ausgerichtete, forschungs- und klimapolitisch geprägte Forschungsprogramme, -kampagnen und -projekte konzipiert, organisiert, durchführt und kommuniziert. Damit will sie erklärungs- und problemrelevantes empirisches Wissen systematisch erzeugen, in seiner Richtigkeit überprüfen und es theoretisch formulieren und kontextualisieren, wobei sie verfügbare disziplinäre Theorien nutzt, kombiniert, spezifiziert und (als Anwendungsgrundlagentheorien) weiterentwickelt.¹¹⁸

Im Prinzip bestätigt sich somit die eingangs zitierte Projekthypothese, dass bei der – in modernen (Wissens-)Gesellschaften unvermeidlichen (vgl. Weingart 2001) – Nutzung von Wissenschaft zur Behandlung und Lösung praktischer Probleme die Herstellung organisationaler oder gar struktureller Kopplungen zwischen Wissenschaft und Politik – in Form von Grenzorganisationen und Assessments – sowohl die Variationsmöglichkeiten von interdisziplinärer Forschung erhöht als auch die für die Bereitstellung wissenschaftlicher Forschungsleistungen nötigen Schließungsprozesse wissenschaftlicher Forschung stimuliert; dabei kommt der disziplinären Struktur der Wissenschaft bei der Übersetzung von außerwissenschaftlich formulierten Problemen eine zentrale Orientierungsfunktion zu, da sie anschlussfähige Wissensbestände bereithält, die eine Übersetzung gesellschaftlicher Probleme in Forschungsprobleme erst erlauben.

Ob „der Bezug wissenschaftlicher Forschung auf gesellschaftliche Problemlagen ebenfalls und in zunehmendem Maße Institutionalisierungschancen bietet, die die künftige disziplinäre Struktur der Wissenschaft beeinflussen werden“ (Halfmann et al. 2003:10) und zur Herausbildung neuer Disziplinen führen, ist angesichts der eingeführten Unterscheidung von Disziplinen, Fächern, wissenschaftlichen Spezialgebieten und Forschungsfeldern nicht unbedingt zu erwarten. Während gesell-

118 Ähnliches hielten bereits Küppers et al. (1978) für die Umweltforschung fest.

schaftlich gewollte und forcierte problemorientierte (multidisziplinäre) Forschung im Falle hinreichender Spezifikation, wissenschaftlicher Bearbeitbarkeit und auch Resonanz mit beträchtlicher Wahrscheinlichkeit zur Entstehung oder Ausweitung eines (neuen) – in unterschiedlichen Spezialgebieten und Disziplinen oder Fächern verankerten – Forschungsfeldes und im Falle seiner theoretischen Anschlussfähigkeit auch eines oder mehrerer wissenschaftlicher Spezialgebiete führen dürfte, ist ihre Institutionalisierung als eigenständiges Fach mit den ihm eigenen Ausbildungsgängen, Journalen etc. weniger wahrscheinlich und als genuine (auf ein theoretisches Integrationsniveau bezogene) Disziplin eher unwahrscheinlich.

So hat sich die Ozonforschung zu einem eigenen Forschungsfeld und allenfalls begrenzt zu einer Specialty entwickelt, da ihre Aspekte nur temporär bezogen auf den stratosphärischen Ozonabbau separat und vorzugsweise im Rahmen bereits existierender wissenschaftlicher Spezialgebiete wie atmosphärische Chemie, Theorie der Mesosphäre etc. untersucht werden. Ihr Gegenstandsbereich verfügt jedoch nicht über die Breite, um ein eigenes Fach Ozonwissenschaft auszubilden.

Hingegen kann bereits seit mindestens zwei Jahrzehnten sowohl von einem Fach Atmosphärenwissenschaften (atmospheric sciences) als auch von einer in ihm sozial und kognitiv verankerten Subdisziplin atmosphärische Chemie gesprochen werden, die sich auf der Grundlage genuin chemischer Theorien mit der Analyse chemischer Substanzen und Reaktionen in der Atmosphäre und deren theoretischer Einordnung und problembezogener Verknüpfung mit atmosphärenphysikalischen (und vegetationsbedingten biologischen) Randbedingungen befasst (vgl. Halfmann et al. 2008).

Was schließlich die breit angelegte Klimaforschung angeht, so weist sie wie gesagt deutliche Anzeichen der Bildung eines eigenständigen Fachs, nicht jedoch einer Disziplin auf, das sich über die Untersuchung, die theoriebasierte Erklärung und die Entwicklung von Lösungsoptionen des praktischen Problems eines anthropogen verursachten Klimawandels konstituiert.

Wie bereits angesprochen, unterscheiden sich die sozialen Strukturmerkmale sowohl der Ozonforschung als auch der Klimaforschung in verschiedenen Phasen ihrer Entwicklung deutlich. Während etwa der ersten drei Phasen waren beide Bereiche von akademisch orientierten, an grundlegenden Erklärungen der beobachteten und (kooperativ) vermessenen Phänomene interessierten Motiven geprägt, wobei von eigenständigen, sozial ausdifferenzierten Forschungsfeldern vor allem in der Klimaforschung noch kaum gesprochen werden kann, sodass ihre sozialen Strukturmerkmale weitgehend durch den sozialen Rahmen derjenigen sich teils selbst gerade erst etablierenden Fächer bzw. Disziplinen bestimmt wurden, in denen sie verankert waren, wie Meteorologie, Geografie oder Photophysik. Dabei unterscheiden sich Ozonforschung und Klimaforschung insofern, als sich erstere frühzeitig in einem bereits relativ professionalisierten Rahmen abspielte, während in letzterer für sich arbeitende Einzel- und auch Amateurwissenschaftler bis etwa zum zweiten Weltkrieg eine signifikante Rolle spielten, deren Forschungsergebnisse vom Mainstream etwa der Meteorologie des Öfteren nicht beachtet oder zurückgewiesen wurden. Organisationale Kopplungen in Form von Grenzorganisationen und wissenschaftlichen Assessments gewannen zwar vor allem in der Meteorologie eine gewisse Bedeutung¹¹⁹, über die verschiedene wissenschaftsexterne und -interne Interessen vermittelt und bedient wurden, die einerseits insbesondere verbesserte Wettervorhersagen betrafen und aus Landwirtschaft, Schifffahrt, Luftfahrt, Militär oder Kolonialverwaltung stammten, und die sich andererseits auf Einrichtung und Betrieb entsprechender Messstationen sowie die (international) koordinierte Erhebung von Wetterdaten bezogen. Sie hatten jedoch für die

119 Genannt seien die Gründung der International Meteorological Organization (IMO) 1873, der WMO 1948/50, der IOC 1948, die WWR-Initiative (World Weather Records) 1923, die Etablierung eines Netzwerks der Ozonmessstationen 1927, das IGY 1957-58/59, die Gründung des National Center for Atmospheric Research (NCAR) 1960.

Klimaforschung allenfalls indirekte Bedeutung, indem sie für diese (später) interessante Messdaten generierten, während es sich im Falle der Ozonforschung um zwar explizite, jedoch primär wissenschaftsintern bestimmte Organisationsbildungen handelte.

In den vor allem interessierenden letzten drei Phasen spielten organisationale Kopplungen hingegen durchaus eine maßgebliche Rolle, als hier die Orientierung von Ozonforschung und von Klimaforschung auf ein praktisches, gesellschaftlich relevantes Problem über entsprechende Grenzorganisationen und Assessments – im Gefolge etwa des Coordinating Committee on the Ozone Layer (CCOL) und des Ozone Trends Panel (OTP) bzw. von GARP, der Study of Man's Impact on Climate (SMIC), WCRP und der Advisory Group on Greenhouse Gases (AGGG) – insbesondere über das SAP (als auch das TEAP und das EAP) und das IPCC eindeutig zum Tragen kommt, deren Einrichtung, Glaubwürdigkeit und Wirksamkeit von den maßgeblichen wissenschaftlichen und politischen Akteuren gezielt angestrebt wurde und deren Arbeit organisatorisch verankert und auf Dauer gestellt wurde. Nicht unerwartet sind die Institutionalisierung, allseitige Anerkennung und klima(forschungs)-politische Wirksamkeit solcher Arrangements allerdings oft ein mühsamer, konfliktbeladener, von gegenläufigen Interessen und Weltansichten geprägter und sich insgesamt teils über Dekaden hinziehender Prozess.¹²⁰ Ebendiese Grenzorganisationen prägen auf Seiten der Wissenschaft die Forschung mittelbar, indem sie Themen und Forschungsfragen formulieren, den Forschungsprozess teils zeitlich auf die Erstellung der Assessments hin strukturieren und über systematischen Informationsaustausch und Review-Prozesse zur innerwissenschaftlichen Konsensbildung beitragen. Auf Seiten der Politik und öffentlichen Debatte – sowohl im Rahmen nationaler Klimapolitiken als auch des sich formierenden internationalen Klimaregimes – sorgen sie für die organisierte und gezielte Vermittlung von Forschungsergebnissen in Form von kontinuierlichen Diskursen mit dem Austausch von Informationen und Argumenten in Arbeitsgruppen, von Monitoring-Programmen und Assessments, sodass eine regelmäßige, institutionalisierte Kommunikation zwischen wissenschaftlichen, wirtschaftlichen und politischen Akteuren mit der entscheidungsrelevanten Vermittlung und Rezeption wissenschaftlichen Wissens (und Nichtwissens) zustande kommt. Gerade Monitoring-Programme können und sollen die Wirksamkeit von (im Rahmen des Ozonregimes oder Klimaregimes) umgesetzten (klima)politischen Maßnahmen nachweisen und überprüfen, wie dies etwa im jüngsten Ozon-Assessment (WMO 2007) bewusst dargestellt wird. Wie die vergleichende Untersuchung von Umweltprobleme behandelnden Assessments ergeben hat (vgl. Farrell/Jäger 2006, Mitchell et al. 2006) können auf wissenschaftlicher Expertise beruhende Assessments politisch und gesellschaftlich durchaus wirkungsvoll sein, wobei dies jedoch eher die Ausnahme als die Regel und ihr Einfluss typischerweise indirekter Natur ist. Dabei beurteilen unterschiedliche Adressaten und Auditorien sie nach unterschiedlichen Kriterien.¹²¹ Ob wissenschaftliche Beratung in Form von (in Auftrag gegebenen) Assessments Einfluss gewinnt, hängt von ihrer Relevanz¹²², Glaubwürdigkeit¹²³ und Legitimität¹²⁴ ab, wobei zwischen diesen Kriterien häufig trade-offs bestehen. Hierbei spielt die (prozedurale) Gestaltung des Assessment-Prozesses mit der

120 Die Kritiken am und die Debatten um die prozeduralen Modalitäten bei der Erstellung des 2. IPCC-Berichts liefern hierfür ein gutes Beispiel (vgl. Edwards/Schneider 1997, 2001).

121 Dabei können auch unterschiedliche nationale Diskurse und Regierungen in verschiedenen Ländern signifikante Effekte zeitigen, wie z.B. der Vergleich von Deutschland und den USA in Bezug auf Perception und Einfluss der IPCC-Berichte deutlich macht (vgl. Grundmann 2007).

122 Fokussiert das Assessment auf Fragen, die für Entscheidungsträger relevant sind?

123 Ist das Assessment wissenschaftlich abgesichert?

124 Wurden die verschiedenartigen Stakeholder-Interessen im Prozess des Assessments in fairer Weise berücksichtigt?

weit gefassten Einbeziehung und Beteiligung möglichst vieler Stakeholder zu Beginn (geeigneter Fokus und Förderung der Glaubwürdigkeit) und am Ende (nutzerorientierte Rahmung der Outputs) eine wichtige Rolle, was dem SAP und dem IPCC weitgehend gelungen ist.

Was die benannten Optionen forschungspolitischer Steuerung anbelangt, ist im Hinblick auf Klima(forschungs)politik und Klimaforschung offenkundig, dass erstere bis auf Forschungsverbote sämtliche Optionen der Einflussnahme mehr oder minder ausgiebig genutzt hat: Sie hat Klimaforschungseinrichtungen gegründet und teils auch wieder geschlossen, sie hat sie mit wachsenden und institutsspezifisch unterschiedlichen Ressourcen ausgestattet, sie hat ihnen in unterschiedlichem Ausmaß Forschungsziele vorgegeben und sie hat teilweise über die Auswahl des Leitungspersonals mitentschieden. Demgegenüber ist die rechtliche Regulierung des Forschungshandelns überwiegend generellerer Natur und weniger spezifisch für den Bereich der Klimaforschung festgelegt¹²⁵, über die daher im Rahmen anderer Politiken entschieden wird. Über diese Steuerungsmodi hat die Klimaforschungspolitik zunächst vor allem das Wachstum und den Fortschritt der Klimaforschung zu forcieren gesucht und darüber hinaus zu unterschiedlichen Zeiten in unterschiedlichem Maße Forschungsthemen mitbestimmt und, insbesondere durch gezielte Forschungsförderung und -programme, auf Forschungstypus, -instrumentierung und Problemorientierung Einfluss genommen.¹²⁶

Bei im Grundsatz ähnlichen Gegebenheiten im Bereich der sachlich spezifischer abgegrenzten Ozonforschung forcierte (und erzwang) die Ozon(forschungs)politik darüber hinaus die problemorientierte Kooperation von Wissenschaftler(gruppe)n aus verschiedenen Fachgebieten, wie Meteorologie, Atmosphärenphysik, atmosphärische Chemie, physikalische Chemie, Klimamodellierung und Wetterdienste im deutschen Ozonforschungsprogramm (vgl. BMBF 2000).

Insofern Ozonforschung und Klimaforschung umfangreiche und kooperativ abgestimmte Forschungsvorhaben verlangen, spielen Forschungsorganisationen in ihnen auf verschiedenen Ebenen eine wichtige und wachsende Rolle. Sie sind vorrangig für die Durchführung ihrer Forschungsprogramme und -projekte verantwortlich, sie verwalten und akquirieren Forschungsmittel und sie sorgen gleichsam als Brücken-Variable zwischen politischen Steuerungsmaßnahmen und teilsystemischem Handeln für die Kopplung zwischen Klimaforschung und Klima(forschungs)politik, die den Leistungsaustausch des Wissenschaftssystems mit anderen Funktionssystemen wie insbesondere die Finanzierung der Klimaforschung, ihre rechtlichen Rahmenbedingungen oder den Transfer klimawissenschaftlichen Wissens in die Klimapolitik sicherstellt (vgl. Conrad 2009a, Halfmann 2008, Hiller 2009, Schimank 2005, 2006).¹²⁷ Von daher haben sie mit ihren Aktivitäten maßgeblich zur Bildung sowohl von Problemgemeinschaft(en) als auch von Grenzorganisationen der Ozon- und der Klimaforschung beigetragen.

Zusammenfassend konstituieren insbesondere die angeführten Grenzorganisationen die organisationalen Kopplungen für die praktische Gestaltung und Durchführung der von wissenschaftsexternen Akteuren vorgegebenen Rahmenbedingungen. Sie bestimmen teils auch die thematischen Schwerpunkte der Ozon- und der Klimaforschung mit, bilden das Medium für Abstimmungs- und Aushandlungsprozesse zwischen Wissenschaft und Politik bis hin zur begrenzten Einflussnahme auf Formulierungen in Assessments, erlauben Grenzziehungen zur Aufrechterhaltung autonomer

125 Ein tentatives Beispiel sind die unterschiedlich restriktiven Regelungen über die Offenlegung von Klimaforschungsdaten in den USA und der EU.

126 Dies kommt besonders bei den große finanzielle und organisatorische Ressourcen beanspruchenden Technologien und Kampagnen wie Klimarechenzentren, Satellitenmessungen, Eiskernbohrungen zum Tragen.

127 Dabei bleibt festzuhalten, dass Forschungsorganisationen nicht über den Reputationsgewinn von Wissenschaftlern und auch nicht über den Erkenntniszuwachs der durch sie veranlassten Forschung entscheiden können.

Entscheidungskompetenz der Wissenschaft über die Geltung von Wahrheitsansprüchen und organisieren – u.a. mithilfe autoritativer Assessments – die Vermittlung und Wissenschaftskommunikation von Forschungsergebnissen.¹²⁸

Somit verläuft die Entwicklung sowohl der Ozonforschung als auch der Klimaforschung in angesichts der Gegebenheiten einer problemorientierten multidisziplinären Forschung und einer dadurch ‚politisierten‘ Wissenschaft in soziologisch zu erwartenden ‚typischen‘ Bahnen, in denen die Wissenschaft – auf der Basis von wissenschaftsexternem Problembezug und von wissenschaftsinternem Disziplinenbezug – (problem)relevantes Wissen identifiziert, gewinnt, prüft und kommuniziert und die Politik – abhängig von ihrer jeweiligen (situativen) Ausrichtung und Interessenlage – in kognitiver Hinsicht darauf aufbauende (internationale) Umweltregime zu etablieren und wirksam werden zu lassen sucht (vgl. Grundmann 2005, 2007, Skolnikoff 1997).

Die Auflösung wissenschaftlicher Kontroversen, in denen für einen kreativen Forschungsprozess durchaus erwünschte widersprüchliche erklärende Theorien um ihre Anerkennung konkurrieren, stellt ein entscheidendes Kriterium ihrer Geltungsberechtigung und damit ihres Status und ihrer Stabilität dar. Dabei ist allerdings in Rechnung zu stellen, dass „Kontroversen und die mit ihnen verbundenen Diskussionen über Gültigkeit, Verlässlichkeit und Interpretation von Angeboten neuen Wissens seltene Ereignisse [sind] und deshalb nicht den dominanten Modus der Integration neuen Wissens in den Wissensbestand einer Gemeinschaft bilden [können].“ (Gläser 2006:133) Da Kontroversen jedoch wie beschrieben die Entwicklung(sdynamik) sowohl der Ozonforschung als auch der Klimaforschung maßgeblich mitgeprägt haben¹²⁹, sollen in diesem Zusammenhang deren unterschiedliche Dissens-Niveaus und Schließungsmechanismen skizziert werden; denn bei der Analyse solcher Kontroversen ist zum einen zu fragen, ob die wissenschaftliche Kontroverse für sich allein besteht oder in eine gesellschaftspolitische eingebettet ist, und sind zum andern verschiedene Dissens-Niveaus der hier interessierenden primär wissenschaftlichen Kontroversen zu unterscheiden.

Ist die wissenschaftliche Kontroverse wie z.B. in den Fällen eines anthropogen bedingten CO₂- oder Temperaturanstiegs in eine gesellschaftspolitische eingebettet, spielen zwei kritische Schwellen eine Rolle: das Erreichen öffentlicher Aufmerksamkeit und das Erreichen der Hegemonie innerhalb der Kontroverse (vgl. Grundmann 1999:144). Daran wird deutlich, dass ihre Entwicklung und Auflösung mit ihrer gesellschaftspolitischen Brisanz zusammenhängt, dass zumeist wissenschaftliche und anderweitige nichtwissenschaftliche Argumente parallel mobilisiert, vermischt und als Rationalisierung sozialer Interessen im öffentlichen Diskurs bzw. als normative Vorgaben in der wissenschaftlichen Debatte eingesetzt werden, dass ihre Schließung auch und eher vorrangig über Macht qua Mobilisierung des Expertenwissens mit dem größten Gewicht und nicht primär über wissenschaftlich überlegene Erklärungen erfolgt¹³⁰, und dass nicht beide Kontroversen (gleichzeitig) aufgelöst werden müssen.

128 Unabhängig von dieser Problemorientierung der Ozon- und der Klimaforschung finden sich wissenschafts-intern die üblichen reputationsorientierten Einflüsse und Kontroversen.

129 „After all, the best scientists always had points of disagreement, and they always would, new disputes at the outside edge of what they knew. Few people realized that the concept of global warming itself had originally flatly contradicted scientists' beliefs – that it had been scoffed at or ignored, and won grudging acceptance only through a century of detailed scrutiny of many thousands of observations and theoretical studies.“ (Weart 2005, *The Public and Climate Change* (continued, 1980-2001): 26)

130 Bekanntermaßen werden auch genuin wissenschaftliche Kontroversen, insbesondere im Falle damit verbundenen Paradigmenwechsels, vielfach über die einfluss- und machtgestützte Herausbildung einer dominanten Erklärung und selten wissenschaftlich entschieden (vgl. Kuhn 1973, Collins 1985), auch wenn das genuine Interesse von Wissenschaftlern an der Veröffentlichung völlig neuer, ältere Arbeiten widerlegender Forschungsergebnisse groß ist und deren

An den Beispielen des Ozonlochs oder des anthropogen bedingten Temperaturanstiegs lassen sich etwa folgende unterschiedliche Dissens-Niveaus wissenschaftlicher Kontroversen relativ deutlich unterscheiden:

- Aus (unterschwellig) zumeist primär nichtwissenschaftlichen weltanschaulichen (oder ökonomischen) Gründen wurden vehement divergierende Erklärungshypothesen propagiert.¹³¹ Dabei wurde sogar die Existenz oder die anthropogene Verursachung des Ozonlochs trotz diesbezüglich eindeutiger wissenschaftlicher Indizien geleugnet.¹³² Hier handelt es sich um „Ozonmythen“ (vgl. Böschen 2000, Dotto/Schiff 1978, Graedel/Crutzen 1994), wo bereits abgehandelte Argumente der wissenschaftlichen Rationalisierung dieser Gegenpositionen dienten.¹³³ Analog wurden die Existenz oder die anthropogene Verursachung des Temperaturanstiegs trotz der seit den 1990er Jahren diesbezüglich zunehmend eindeutiger Indikatoren und Belege bestritten. Auch hier handelt es sich um Mythen, pseudowissenschaftliche Studien und gezielte Desinformations-kampagnen etwa der Global Climate Coalition und ihr angehörender Konzerne, wo wiederum bereits abgehandelte Argumente der wissenschaftlichen Rationalisierung dieser Gegenpositionen dienten (vgl. Al Gore 2007, Böschen 2000, Dessler/Parson 2006, McCright/Dunlap 2000). Die Schließung einer solchen zugleich auch gesellschafts-politischen Kontroverse erfolgt (nach außen) typischerweise durch (in der Öffentlichkeit kommunizierte) entscheidende Messserien und autoritative scientific Assessments.
- Es ist zwischen konkurrierenden, sich grundlegend unterscheidenden, einander mehr oder minder ausschließenden wissenschaftlichen Erklärungen zu entscheiden. Dies trifft für die Mehrzahl der in Kapitel 4 zusammenfassend aufgeführten früheren bis 1970 weitgehend abgeschlossenen Kontroversen zu, die angesichts der seinerzeitigen geringen außerwissenschaftlichen Bedeutsamkeit der Klimaforschung im Allgemeinen noch in keine gesellschaftspolitische Kontroverse eingebettet waren. Beispielhaft können hier etwa Kontroversen um Erklärungen früheren Klimawandels, um (frühere) unterschiedliche Erklärungen der Eiszeiten, um den Anstieg der atmosphärischen Kohlendioxidkonzentration, aber auch um den Anstieg der mittleren globalen Temperatur genannt werden. Im Falle des Ozonlochs waren dies die dynamische, vulkanische, chemische und Sonnenzyklus-Hypothese, von denen sich die chemische als die zutreffende erwies (vgl. BMBF 2000, Conrad 2008b). Aufgrund der involvierten, typischerweise beträchtlichen reputationswirksamen vested interests verlangt die Schließung solcher Kontroversen zumeist aufwändige, definitive Aussagen erlaubende Untersuchungen¹³⁴, in denen entscheidende Experimente und Messungen, die Standardisierung von

Verzögerung durch konkurrierende Gruppen häufig dazu dient, ebendiese neue Hypothese selbst auf den Publikationsmarkt zu werfen.

131 „The growing controversy about the cause of the ozone hole represented more than just differing scientific interpretations of existing data. It reflected the diverse instinctal responses among scientists and policy-makers to the threat of large-scale ecological change... A faith in nature's benevolence or, conversely, the conviction that the environment was highly vulnerable to manmade changes, could not help but influence the debate and directly contribute to the formulation of scientific theory.“ (Cagin/Dray 1993:291)

132 Noch Ende 1987 erklärte der damalige Hoechst Vorstandsvorsitzende Schadow, dass das „seit einigen Jahren entdeckte, rätselhafte Ozonloch wissenschaftlich nicht mit den FCKW in Verbindung zu bringen“ sei (zitiert nach Böschen 2000:47)

133 So beklagte Crutzen (1996:1891) in seinem Nobel-Vortrag im Hinblick auf inzwischen anerkannte Theorien der Ozonzerstörung: „Hier, wo die Beziehung zwischen Ursache und Wirkung selbst für Laien sehr deutlich ist, deprimiert es enorm zu sehen, dass sie von einer kleinen Gruppe sehr lauter Kritiker, die keine Leistungen in diesem Forschungsfeld erbracht haben, noch immer nicht akzeptiert wird. Einige von ihnen sind kürzlich sogar in den US-Kongress gewählt worden.“

134 So wurde im Falle des Ozonlochs die zu diesem Zweck durchgeführte, aufwändige Antarktis-Expedition NOZE II von den beiden NASA-Verantwortlichen als kleines Manhattan-Projekt angesehen (vgl. Lambright 2005, Roan 1990).

- Messverfahren und Datenauswertung und hochrangige Urteile eine zentrale Rolle spielen (können).
- Auf der Grundlage einer im Kern gemeinsamen Theorie oder (Klima-)Modells werden unterschiedliche Ursachen und Prozesse postuliert und betrachtet, die sich nicht wechselseitig ausschließen müssen, sondern ergänzen und überlagern können und deren relative Gewichtung offen und kontrovers ist. Beispiele sind die Erklärung des globalen Temperaturverlaufs, der Netto-Strahlungsantrieb von Aerosolen, der anteilige Verbleib von Kohlendioxidemissionen in Ozean und Biosphäre, oder unterschiedliche chemische Prozesse als Hauptursache des Ozonlochs. Hier spielen vorwiegend entscheidende Messungen, möglicherweise verbunden mit der Standardisierung von Mess- und Auswertungsverfahren und mit Modellsimulationen, die Hauptrolle bei der Schließung der meist mit weniger vested interests verbundenen Kontroversen.¹³⁵

Bei der Schließung wissenschaftlicher Kontroversen spielen – insbesondere im Falle ihrer gesellschaftspolitischen und ökonomischen Relevanz – typischerweise die Mobilisierung autoritativen Expertenwissens, Standardisierungsprozesse und/oder Schlüsselexperimente eine entscheidende Rolle (vgl. Grundmann 1999), die oft beträchtliche Ressourcen erfordern, die angesichts konfligierender vested interests möglicherweise nicht verfügbar sind. Exemplarisch angeführt seien die Kampagnen zur Untersuchung des stratosphärischen Ozonabbaus in der Antarktis und in der Arktis, die IPCC-Berichte, systematische Modellvergleichsprojekte und – in Grönland und der Antarktis durchgeführte, Vergleiche der Nord- und Südhemisphäre erlaubende – Eiskernbohrungen.

Fragt man mit Blick auf die beschriebenen Entwicklungsdynamiken nun, welche Rolle wissenschaftliche Kontroversen hierbei gespielt haben, so ergibt sich etwa folgendes Bild.

In der Ozonforschung betrafen die drei wesentlichen, jeweils in einer Phase virulenten Kontroversen entweder unzutreffende theoretische Werte oder konkurrierende theoretische Erklärungen, wobei ihre gesellschaftspolitische Relevanz in der 4. und 5. Phase in Verbindung mit dem durch FCKWs ausgelösten stratosphärischen Ozonabbau beträchtlich war. Da sie eine hohe innerwissenschaftliche Brisanz besaßen, stellten sie ein Spannungsmoment dar, das die Ozonforschung vorantrieb, indem innerwissenschaftlich (aber nicht unbedingt außerwissenschaftlich) ein starkes Interesse an der Auflösung dieser Kontroversen durch entsprechende Messkampagnen, verbesserte Messverfahren und entscheidende Experimente bestand, die auch finanziert und umgesetzt wurden (vgl. Conrad 2008b, Conrad et al. 2009, Grundmann 1999, Parson 2003) und damit jede der beiden skizzierten Entwicklungsdynamiken der Ozonforschung zeitweise unterstützten.

In der Klimaforschung waren die frühen, während der ersten drei Phasen aufkommenden Kontroversen stark dadurch geprägt, dass zum einen teilweise wissenschaftliche Außenseiter mehr oder minder etablierten wissenschaftlichen Instituten gegenüberstanden und zum anderen ihre Hypothesen angesichts unzureichender oder gar widersprechender Datenlagen im Lichte des damals verfügbaren Wissens durchaus begründet zurückgewiesen werden konnten. Vor dem Hintergrund der damaligen, eher indirekten und zufallsbedingten Entwicklungsdynamik der Klimaforschung trugen Kontroversen begrenzt dazu bei, sie durch diesbezügliche Debatten, verstärkte Forschungsanstrengungen und Kontrollexperimente voranzutreiben, aber eben in einer eher situativ geprägten und punktuellen Weise. In den späteren Kontroversen einer zunehmend sozial ausdifferenzierten und etablierten Klimaforschung ging es angesichts des virulenten praktischen Problems anthropogen bedingter Klimaveränderungen um deren eindeutige Schließung durch verbesserte Messun-

135 So wird inzwischen dem Chlormonoxid-Dimer-Zyklus 75% Anteil und dem gekoppelten Chlor-Brom-Zyklus 20% Anteil an der Bildung des antarktischen Ozonlochs zugerechnet (vgl. Anderson et al. 1989, Solomon 1999).

gen und Simulationen, die eben nicht trivial war, und die mit divergierenden Grundüberzeugungen hinsichtlich der (Strahlungs-)Antriebe und Dynamik des Klimasystems verbunden waren und darum vehement ausgefochten wurden. Sie haben jedenfalls die Eigendynamik der Klimaforschung durch aufwändige Messkampagnen, Modellsimulationen und die Erstellung von Assessments massiv gestützt und teils auch inhaltlich geprägt.

6 Wissenschaftssoziologische Schlussfolgerungen

Zusammengefasst führt die Rekonstruktion der Entwicklung von Ozonforschung und Klimaforschung zu folgender, auf wissenschaftssoziologischer Ebene eher ‚trivialen‘ Schlussfolgerung: Wenn die erforderlichen sozialen Randbedingungen gegeben sind, dann entsprechen ihr Verlauf und ihre Ergebnisse in etwa dem, was man (soziologie-)theoretisch erwarten würde. Dies wird nachfolgend zunächst für die hier vor allem interessierende zweite, stark problemorientierte Entwicklungsdynamik dieser Forschungsfelder plausibilisiert.

Als mehr oder weniger notwendige, bedeutsame soziale Randbedingungen sind anzuführen:

- Es existiert ein praktisches gesellschaftliches Problem, das zudem – wie der Abbau der stratosphärischen Ozonschicht oder der Klimawandel – von gravierender und relativ ubiquitärer Natur ist, das wissenschaftlich entdeckt und bestätigt wurde und von daher als real vorhanden eingestuft werden muss, das (außerhalb der Wissenschaft) sozial perzipiert wird und das sozial relevant ist, insofern seine Lösung teils mit bestehenden gesellschaftlichen Präferenzen, Strukturen und Interessenlagen konfligiert.
- Dieses praktische Problem ist in wissenschaftliche Problemstellungen übersetzbar und sodann wissenschaftlich beschreibbar und bearbeitbar, und wissenschaftlich begründete Lösungsoptionen sind nachweisbar.
- Dies ermöglichende, teils in der Vergangenheit innerhalb der Ozonforschung oder der Klimaforschung entwickelte (etwa aus Hydrodynamik oder physikalischer Chemie stammende) Grundtheorien¹³⁶ liegen vor, sodass die disziplinäre Anschlussfähigkeit der so formulierten wissenschaftlichen Probleme im Wissenschaftssystem gegeben und ihre theoriebasierte Behandlung daher nicht nur möglich, sondern für die jeweilige wissenschaftliche Produktionsgemeinschaft auch von Interesse und potenziell reputationsträchtig ist.
- Somit besteht eine Überlagerung und Kopplung von (außerwissenschaftlichem) sozialem Problemdruck, sozialem Interesse an und Nachfrage nach wissenschaftlicher Untersuchung und Lösung eines praktischen Problems und von (inner)wissenschaftlichen Erkenntnis- und Reputationsinteressen.
- Dem korrespondieren die Ausweitung der Forschungsförderung, der Aufbau einer entsprechenden Forschungsinfrastruktur, die gezielte Nachfrage nach problemorientierten wissenschaftlichen Untersuchungen und die Ausarbeitung, Abstimmung und Durchführung geeigneter Forschungsprogramme.

136 Genannt werden können hier beispielsweise Chapmans chemische Theorie des Ozongleichgewichts, die dynamische Theorie stratosphärischer Zirkulation von Brewer und Dobson, Arrhenius' Temperatur und Treibhausgase verknüpfendes Klimamodell oder Bjerknes' hydrodynamisches Modell der Atmosphäre.

- Um den Transfer von problembezogener Forschungsnachfrage und wissenschaftlichen Erkenntnissen und entsprechende Austausch- und Abstimmungsprozesse effektiv und dauerhaft zu gewährleisten, entwickeln, stabilisieren und vervollständigen sich – auf der Grundlage gezielter organisatorischer Vorkehrungen und Verankerungen – als legitim eingestufte operative, organisationale und möglicherweise strukturelle Kopplungen zwischen Wissenschaft und Politik (oder Wirtschaft).
- Dazu gehören einerseits die Einbeziehung und Berücksichtigung der vielfältigen Stakeholder etwa bei der Vorbereitung und der Verbreitung von Assessments und andererseits die Aufrechterhaltung der allein wissenschaftsinternen Zuständigkeit für die Erstellung von Assessments und die Durchführung von Monitoring-Programmen, was die Formulierung ihrer wissenschaftlichen Aussagen anbetrifft, sodass wissenschaftsexterne Einflüsse zwar maßgeblich die Rahmenbedingungen und Schwerpunkte der Forschung zu prägen vermögen, jedoch nicht ihre substanziellen kognitiven Ergebnisse.

Unter ebensolchen sozialen Randbedingungen sind folgende Entwicklungsmuster der Forschung zumindest wahrscheinlich:

- Sowohl umfangreiche (international koordinierte) Forschungsprogramme und -vorhaben als auch aufwändige Assessments und Monitoring-Programme sowie hierfür zuständige, wissenschaftliche Glaubwürdigkeit gewährleistende Grenzorganisationen stellen als Brücken-Variable gewissermaßen wesentliche soziale Voraussetzungen und zugleich bereits Folgewirkungen der skizzierten allgemeinen sozialen Randbedingungen dar.
- In diesem Rahmen kommt es zur gezielten und systematischen wissenschaftlichen Erforschung, Spezifizierung und Erklärung des als gesellschaftliches Problem perzipierten Objektbereichs und Wirkungszusammenhangs, zur Simulation seiner voraussichtlichen Entwicklungspfade und zur Ausbildung eines problemorientierten wissenschaftlichen Spezialgebiets, das (als finalisierte Specialty) vor allem Anwendungsgrundlagentheorien entwickelt.
- Die Forschung spezifiziert und kombiniert dabei problemorientiert verfügbare Theoriemodule aus teils unterschiedlichen Disziplinen. Die Problemorientierung der Forschung schlägt damit sowohl auf ihre kognitive Rahmung und Ausrichtung als auch auf ihren Forschungsstil durch, der durch die Orientierung an und Einbindung in zeitlich befristete Forschungsprogramme und -projekte, Rechenschaftspflichtigkeit, Anwendungsbezug und Aufweis konkreter Ergebnisse, Präsentation und Verbreitung seiner Ergebnisse in auch außerwissenschaftlich verständlicher Form gekennzeichnet ist.
- Diese problemorientierten Forschungen und Assessments sind ergebnisorientiert, führen in der Tendenz zu eindeutigen Ergebnissen und forcieren die diesbezügliche wissenschaftliche Konsensbildung.
- Diese Ergebnisse werden in den (klima)politischen Prozess eingespeist, wobei sie sich als begrenzt wirksam erweisen (können).
- Aufgrund von Rückkopplungen der benannten sozialen Randbedingungen bildet sich vermutlich eine positive Interaktionsdynamik heraus, die für die Entwicklung des Forschungsfeldes entscheidend ist. Wenn z.B. ein als gravierend wahrgenommenes praktisches (Menschheits-) Problem und dazu passende Forschungsinteressen zusammentreffen, dann wird die Herausbildung und Stabilisierung von Grenzorganisationen und Assessments wahrscheinlich. Diese wirken wiederum verstärkend und organisierend – und die Forschung und Problempertzeption damit orientierend – zurück. Somit erzeugt das Zusammenwirken von wissenschaftlicher Beobachtung und Entdeckung, von gesellschaftlicher Problemwahrnehmung und Risikodefinition, und von institutionalisiertem Austausch und Interessenabgleich in Form von massiver Forschungsförderung, supranational organisierten Forschungsprogrammen und -projekten, auf-

wändigen Assessments und inner- und außerwissenschaftliche Legitimität besitzenden Grenzorganisationen ebendiese Interaktionsdynamik.¹³⁷

- Darüber hinaus entwickeln sich tendenziell selbsttragende eigendynamische Prozesse, indem die intensivierete Forschung verstärkt Wissenschaftler anzieht, aufgrund ihrer Ergebnisse viele weitere Forschungsfragen erzeugt, zusätzliche Theorie- und Modellbildung sowie Messkampagnen induziert, und damit eine Sogwirkung zugunsten vermehrter und rascherer Wissensproduktion entfaltet und zur Herausbildung eines institutionell verankerten problemorientierten Forschungsfeldes oder gar eigenständigen Fachs führen kann, wie es sich in der Klimaforschung beobachten lässt.
- Wenn auch durch großzügige Forschungsförderung gemildert, finden sich auch in diesen Forschungsfeldern die typischen Muster innerwissenschaftlicher Kontroversen und der Konkurrenz um Reputation und Ressourcen.
- Die entscheidende Rolle einer positiven Interaktionsdynamik wird schließlich auch daran deutlich, dass solche (problemorientierte) Forschung beschränkt, zurückgeführt und auf die Entwicklung geeigneter problembehandelnder Technologien verlagert werden kann, wenn aus Sicht der die notwendigen Ressourcen bereitstellenden Institutionen ausreichende wissenschaftliche Erkenntnisse erlangt und geeignete Problemlösungen aufgezeigt wurden.

Trotz der hier plausibilisierten, im Falle der Ozon- und der Klimaforschung zutreffenden Wenn-dann-Beziehungen ist festzuhalten, dass es keine Garantie für den erfolgreichen Verlauf eines solchen Prozesses gibt, der sich typischerweise vielfach ungleichzeitig, teils fragmentiert, systematisch konfliktbehaftet, widersprüchlich, offen und mit langwierigen Erkenntnis-, Lern- und Organisationsprozessen verbunden entwickelt und daher lange Zeiträume in Anspruch nehmen kann. Je weiter er allerdings fortgeschritten ist, umso wahrscheinlicher und rascher dürfte er jedoch ablaufen.

Im Vergleich mit anderen problemorientierten Forschungsfeldern zeichnen sich die Ozonforschung und die Klimaforschung beide dadurch aus, dass die unter den gegebenen sozialen Randbedingungen zu erwartende wissenschaftliche Entwicklungsdynamik – allerdings in einem sich über Dekaden erstreckenden langwierigen und nicht immer gradlinigen Prozess – in gewisser Weise bislang sowohl innerwissenschaftlich als auch in der organisationalen Kopplung von Wissenschaft und Politik in diesem Ausmaß bislang relativ einmalig war.¹³⁸

137 Dass sich beispielsweise die Entwicklung der Klimaforschung – trotz lange andauernder Kontroversen und der Zurückweisung von auf signifikanten Indizien basierenden Hypothesen eines anthropogen verursachten Temperaturanstiegs in den betroffenen Fachgemeinschaften – in ihrem Gesamtergebnis letztlich als wissenschaftliche Erfolgsgeschichte einer zwar widersprüchlichen, im Ergebnis jedoch kumulativ ertragreichen problemorientierten Forschung interpretieren lässt, beruht im Wesentlichen auf dem – vor allem seit den 1970er Jahren zu beobachtenden – teils situativ bestimmten (kontingenten) Zusammenspiel positiver Einflussfaktoren bei zunehmender Abwesenheit restringierender Momente, das eine selbsttragende Eigendynamik in der Entwicklung der Klimaforschung induzierte. Dabei waren wissenschaftsexterne Einflüsse auf die inhaltlichen Ergebnisse der Klimaforschung im Sinne sie ermöglichender Rahmenbedingungen, nicht aber im Sinne sie substanziiell mitgestaltender Einwirkung von Bedeutung. Jedenfalls vermag die Klimaforschung inzwischen den über Messungen mittlerweile bereits eindeutig nachweisbaren Klimawandel recht verlässlich zu erklären und in komplexen Klimamodellen zu simulieren, Wege und Schwellwerte seiner gezielten Begrenzung aufzuzeigen, und ihre Forschungsarbeiten und -ergebnisse in der Praxis durchaus entlang dem Ethos der Merton'schen Normen im Sinne eines Sets allgemeiner, für alle Wissenschaft gültiger technischer Produktionsregeln zu gestalten und zu überprüfen.

138 Ein vergleichbares Beispiel stellt – allerdings im Bereich genuiner Grundlagenforschung – wohl die Hochenergiephysik dar.

Hierfür dürften folgende Gründe verantwortlich sein:

- Die typische Struktur geowissenschaftlicher Forschung mit auf die Analyse konkreter (singulärer) Einzelobjekte ausgerichteten Erkenntnisinteressen erleichtert deren Problemorientierung, da sie hierbei in ihrer Grundausrichtung im Wesentlichen unverändert bleiben kann.
- In der Tendenz macht ihre Problemorientierung sie – verstärkt durch mehr verfügbare Fördermittel – wissenschaftlich eher interessanter und reputationsträchtiger.
- Die für ein wissenschaftliches Spezialgebiet wie die Ozonforschung oder für ein Forschungsfeld wie die Klimaforschung bereitgestellten Fördermittel waren in ihrer 10-15-jährigen Hochphase mit weltweit jährlich ca. 100 Mio. € bzw. 4 Mrd. € besonders umfangreich.
- Die Erstellung der politikrelevanten (WMO- und UNEP-basierten) Assessments des SAP, TEAP und EAP für die Vertragsstaaten des Montreal Protokolls ebenso wie des IPCC war und ist in dem hierbei betriebenen Aufwand, der weltweiten Mitwirkungsmöglichkeit und Beteiligung der meisten kompetenten Wissenschaftler, der prozeduralen Absicherung und Offenheit des Review-Prozesses und der bewussten Begrenzung politisch motivierter Einflussnahme^{139,140} außergewöhnlich gut gestaltet und organisiert.
- Die verantwortlichen Grenzorganisationen SAP und IPCC haben eine starke Position (gewonnen), die es ihnen erlaubt, den Assessment-Prozess wie angegeben gegenüber politischen Einflussversuchen trotz starker diesbezüglicher Interessen und Bemühungen abzugrenzen.
- Dadurch verfügen sowohl sie als anerkannte Grenzorganisationen als auch ihre Assessments über hohe inner- und außerwissenschaftliche Glaubwürdigkeit, wie sie sich kaum in einem anderen Forschungsgebiet oder Fach beobachten lässt.
- Das Interesse der Vertragsparteien an einem wirksamen und wissenschaftlich fundierten Ozonregime und mittelfristig auch an einem ebensolchen Klimaregime trug gleichfalls zur Solidität und Breite dieser Forschung und zur Akzeptanz und Reputation der Assessment(Panel)s bei.

Auch im Falle der beiden ersten, sich deutlicher unterscheidenden Entwicklungsdynamiken der Ozon- und der Klimaforschung ist ihr Verlauf nicht unerwartet.

In der sich langsam herausbildenden stratosphärischen Ozonforschung war aufgrund des wissenschaftlichen Erkenntnisinteresses an Reaktionsweisen und Gehalt von Ozon, der Verfügbarkeit von Forschungsressourcen und Messstationen, und ihrer Einbettung in die sich als Fach etablierenden Meteorologie die im Wesentlichen wissenschaftsinterne, durch Theorien der Atmosphärenphysik und atmosphärischen Chemie geprägte Entwicklungsdynamik der Ozonforschung zu erwarten, die insgesamt eher allmählich und schrittweise, aber im Falle unzutreffender theoretischer Werte oder der Verfügbarkeit neuer besserer Nachweismethoden und Messtechniken zeitweise beschleunigt ablief. Eine Problemorientierung kam dabei allenfalls indirekt zum Tragen, insofern Entwicklung und Ausweitung der Wettervorhersage, die industrielle Nutzbarkeit des Ozons oder die Rolle bodennahen Ozons in Smogsituationen qua assoziativer mentaler Verknüpfung die Bereitstellung von Forschungsmitteln erleichtert haben dürften.

In der Klimaforschung kam angesichts ihrer primär regionalen Perspektive, ihrer Phänomenorientierung, unzureichender und widersprüchlicher Datenlagen, kontroverser Debatten sowie der fachlichen Nachrangigkeit und des teils von Amateurwissenschaftlern vorangetriebenen Nachweises

139 Dies gilt z.B. nicht in diesem Maße für NAS/NRC Assessments (vgl. Sarewitz 2004, Mitchell et al. 2006).

140 Dies gilt so nicht für die Summary for Policymakers. Aber auch hier können Texte nicht gegen den erklärten Willen der Wissenschaftler verabschiedet werden.

eines anthropogen bedingten Klimawandels die eher indirekte und teils zufällige, im Wesentlichen aber gleichfalls wissenschaftsinterne Entwicklungsdynamik nicht unerwartet zustande, in der genuin klimawissenschaftliche Erkenntnisse eher Abfallprodukte einer sich ausweitenden meteorologischen Forschung waren, zentrale klimawissenschaftliche Fragen nicht entscheidbar waren, einem globalen Klimakonzept erst in den 1960er Jahren der Durchbruch gelang und praktische gesellschaftliche Problemlagen sich auf das Wetterprognose und -beeinflussung, aber kaum auf das Klima bezogen.

Zusammenfassend lassen sich folglich sowohl die Ozonforschung als auch die Klimaforschung als prototypische (erfolgreiche) Beispiele und exemplarische Belege dafür lesen und interpretieren, dass

- problemorientierte multidisziplinäre Forschung in modernen Gesellschaften der zunehmend vorherrschende Modus wissenschaftlicher Forschung wird,
- ihre damit einhergehende Finalisierbarkeit durchaus von der theoretischen und (mess)technischen Reife der genutzten Fächer und (Sub-)Disziplinen abhängt,
- hierfür organisationale Kopplungen aufgebaut werden und notwendig sind, um Abstimmungs-, Aushandlungs- und Transferprozesse zwischen Wissenschaft und Politik (oder Wirtschaft) zur wechselseitigen Übersetzung und Lösung wissenschaftlicher, technischer und/oder praktischer Probleme für beide Seiten dauerhaft wirksam und erfolgreich zu gestalten
- und dabei die funktionspezifischen Grenzen zwischen dem Wissenschaftssystem und anderen Funktionssystemen aufrechterhalten werden, sodass es zu keiner willkürlichen Mischung unterschiedlicher Rationalitäten oder gar zur Aufhebung seiner funktionalen Differenzierung kommt.

So kam es erst nach einem rund ein Jahrhundert währenden Vorlauf, während dessen die notwendige Theoriebildung und die Gewinnung grundlegender empirischer Daten keineswegs gezielt problemorientiert und durch umfangreiche Assessments erstellende Grenzorganisationen angeleitet, sondern teils eher indirekt und teilweise durch Amateurwissenschaftler entgegen dem fachlichen Mainstream erfolgte, zur massiven Ausweitung finalisierter problemorientierter Ozon- und Klimaforschung mit der Entwicklung von Anwendungsgrundlagentheorien, der Durchführung entscheidender Experimente und Messkampagnen, und der Bestätigung spezifischer Hypothesen und Theorien, die eine Kontroversen abschließende innerwissenschaftliche Konsensbildung zur Folge hatte. Besteht hinreichender Problemdruck, gesellschaftliches Interesse an einer Problemlösung und diesbezügliche Nachfrage nach anwendungsbezogenem wissenschaftlichen Wissen, dann sind bei gegebener Verfügbarkeit wissenschaftlicher Theorien und Messtechniken die Aussichten einer auf die Dauer erfolgreichen wissenschaftlichen Behandlung gesellschaftlicher Problemlagen und Evaluierung von Problemlösungsstrategien gut, sofern genügend Forschungsmittel bereitgestellt und genutzt und die Austausch- und Transferprozesse zwischen Wissenschaft und Politik (und/oder Wirtschaft) wirksam organisiert und strukturell verankert werden. Hierdurch wird die Entwicklung einer positiven Interaktionsdynamik der relevanten Einflussfaktoren wahrscheinlich, die eine Eigendynamik der Forschung induzieren, ihre theoretischen, technischen (und normativen) Resistenzen abbauen und die Gewinnung nutzbarer Erkenntnisse und Messdaten beschleunigen kann.

Demgemäß sind Finalisierungstendenzen sowohl in der Ozonforschung als auch in der Klimaforschung deutlich erkennbar, weil sie sich als zugleich grundlagen- und problemorientierte multidisziplinäre Forschung typischerweise im Spannungsfeld zwischen einem inter-disziplinären Eklektizismus, der nur aus Gründen der sozialen Dringlichkeit betrieben wird, und einem allein durch theoretische Fragestellungen erzeugten wissenschaftlichen Interesse an Anwendungsgrundlagentheorien entwickeln und dabei von der Möglichkeit der wissenschaftlichen Konzeptualisierung sozialer

Ziele Gebrauch gemacht wird. Entsprechend sind auch konkrete Erklärungsmodelle des Abbaus und der Regeneration der stratosphärischen Ozonschicht oder des Klimawandels in ihrer Struktur und ihren Variablen aufgebaut. So sind sie in der Ozonforschung etwa vom Zusammenspiel von FCKW-Emissionen, Transportprozessen in die Stratosphäre, atmosphärischen Dynamiken, chemischen Reaktionen, katalytischen Zyklen und Mikrophysik von Spurengasen in der Stratosphäre und Veränderungen in der Absorption der UV-B Strahlung geprägt, und in der Klimaforschung zielen sie z.B. auf das Verständnis des Zusammenhangs von Treibhausgas-Emissionen, Temperaturanstieg der Atmosphäre, veränderten Niederschlagsprofilen und fluvialen Überschwemmungen. Ein darüber hinausgehender Einfluss dieser Problem- und Zweckorientierung auf die substanzielle Struktur von Theoriebildung und infolgedessen auf die Inhalte von Forschungsergebnissen ist jedoch nicht erkennbar. Mit einer vermehrten Zweckorientierung, Ausweitung und Gewichtsverlagerung der Klimaforschung in Richtung Klimatechnologien, Klimastrategien, Klimafolgenabschätzung dürften wissenschaftsexterne Interessen und Kriterien hierbei verstärkt zur Geltung kommen, ebenso wie die sukzessive Substitution von FCKWs in ihren vielfältigen Anwendungsbereichen durch Entwicklung und Einsatz alternativer Lösungsmittel und Techniken inzwischen im Zentrum der gesellschaftlichen Lösung des Ozonproblems steht.

Nachdem bislang Ozonforschung und Klimaforschung durchweg als zwei typische, trotz gewisser, jeweils benannter Unterschiede im Wesentlichen gleichartige Beispiele für die wissenschaftliche Entwicklungsdynamik und die disziplinären Verankerungen problem-orientierter multidisziplinärer Forschung präsentiert wurden, sollen abschließend ihre in dieser Hinsicht bestehenden Unterschiede deutlich gemacht werden.

Bei in den ersten Phasen ähnlicher Größenordnung der verfügbaren Forschungsressourcen betragen die Fördermittel für die Klimaforschung seit den 1990er Jahren das Zehn- bis Hundertfache derjenigen für die Ozonforschung. Bezeichnenderweise war die Ozonforschung in den frühen Phasen bereits stärker ausdifferenziert und professioneller organisiert. Bei ihr handelt es sich um ein auf ein Spurengas, Ozon, fokussierendes Forschungsfeld mit relativ klar vorgegebenen, problemorientiert geprägten, aber letztendlich genuin innerwissenschaftlich festgelegten Forschungsthemen und -fragen, dessen Erkenntnisinteresse im Sinne von *normal science* dem grundlegenden und zugleich detailgenauen Verständnis des Ozonhaushalts und den Aussichten einer Regeneration der stratosphärischen Ozonschicht gilt.

Demgegenüber zeichnet sich die Klimaforschung – trotz des anthropogen bedingten Klimawandels als ihrem Referenzpunkt – durch eine große und zunehmende Themenvielfalt aus, die sich bereits aus der Vielzahl der das globale Klima und regionale Klimata bestimmenden (physikalischen, chemischen, biologischen und anthropogenen) Faktoren und der großen Bedeutung ihrer mannigfachen positiven und negativen Rückkopplungen ergibt. Dies macht erklärlich, dass die Schließung von tiefer reichenden Kontroversen in der Klimaforschung durchweg weit längere Zeiträume in Anspruch nahm als in der Ozonforschung. Und nicht von ungefähr strebt die Klimaforschung die Entwicklung von Erdsystemmodellen an und sind deutliche Anzeichen der Entwicklung dieses breiten problemorientierten Forschungsfeldes hin zu einem eigenen Fach erkennbar. Schließlich ließ sich das Ozonproblem durch die Entwicklung von FCKW-Substituten technisch lösen, ohne dass dies grundlegende Veränderungen in gesellschaftlichen Struktur-, Prozess- und Verhaltensmustern verlangte. Dagegen erfordert die Bewältigung und Begrenzung des nicht mehr zu verhindernden Klimawandels nicht nur die Entwicklung geeigneter Klimatechnologien, sondern zumindest partiell auch grundlegende, mit beträchtlichen Kosten verbundene Veränderungen ebendieser gesellschaftlichen Muster, was die zähe und unzureichende Umsetzung durchaus verfügbarer Vermeidungs- und Anpassungsstrategien (vgl. IPCC 2005, 2007b, 2007c, Stern 2007) bereits zum Großteil erklärt. Darum war zwar die relativ erfolgreiche Etablierung organisationaler Kopplungen in Form von Grenzorganisationen und umfassenden Assessments und des Ozonregimes durchaus bewusstes Vorbild für analoge Vorgehensweisen in Bezug auf Klimawandel. Dies war jedoch bis-

lang nur auf wissenschaftlicher Ebene der Klimaforschung mit der Einrichtung und Verankerung des IPCC und seiner Reports von Erfolg gekrönt, nicht aber auf der politischen Ebene eines Klimaregimes, was die bekannte Regel bestätigt, dass die wissenschaftlich fundierte Lösung eines praktischen Problems auf kognitiver Ebene (zunächst) eher selten mit seiner substanziellen (politischen) Lösung auf sozialer Ebene verbunden ist.

Gerade angesichts dieser hier benannten Unterschiede gewinnt die beschriebene Gleichartigkeit von Ozonforschung und Klimaforschung hinsichtlich der Gültigkeit der obigen wissenschaftssoziologischen Schlussfolgerungen in Bezug auf Erwartbarkeit, Problemorientierung, Finalisierung, organisationale Kopplungen und Aufrechterhaltung der Grenzen an Gewicht.

7 Literaturverzeichnis

- Beispieltext: Amon, B. (2005): Tier- und umweltgerechte Mastschweinehaltung im Schrägbodenstall. In: FORSCHUNG NEWSLETTER April 2005 / Jahrgang 10 / Ausgabe 2. S. 4-6.
- Agrawala, S, 1997: Explaining the Evolution of the IPCC. Structure and Process. ENRP Discussion Paper E-97-05, Cambridge: Harvard University
- Agrawala, S, 1998a: Context and early origins of the Intergovernmental Panel for Climate Change, *Climatic Change* 39: 605-620
- Agrawala, S, 1998b: Structural and process history of the Intergovernmental Panel for Climate Change, *Climatic Change* 39: 621-642
- Alfsen, K, Skodvin, T, 1998: The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) and scientific consensus. Oslo, Cicero Policy Note 1998:3
- Al Gore, A, 2007: Angriff auf die Vernunft. München: Riemann
- Andersen, S, Sarma, M, 2002: Protecting the Ozone Layer: The United Nations History. London: Earthscan
- Anderson, J. et al, 1989: Ozone destruction by chlorine radicals within the Antarctic vortex : The spatial and temporal evolution of ClO-O₃ anticorrelation based on in situ ER-2 data, *Journal of Geophysical Research* 94 (11): 465-479
- Bechmann, G, Beck, S, 2003: Gesellschaft als Kontext von Forschung. Neue Formen der Produktion und Integration von Wissen. Klimamodellierung zwischen Wissenschaft und Politik. Forschungszentrum Karlsruhe
- Benedick, R, 1991: Ozone Diplomacy. Cambridge: Harvard University Press
- Benedick, R, 1998: Das fragwürdige Kyoto-Klimaprotokoll. Unbeachtete Lehren aus der Ozongeschichte. WZB FS II 98-407, Berlin
- Berz, G, 2002: Naturkatastrophen und Klimawandel: Vorsorge ist das Gebot der Stunde, in: W. Hauser (Hg), *Klima. Das Experiment mit dem Planeten Erde. Begleitband und Katalog zur Sonderausstellung des Deutschen Museums vom 7.11.2002 bis 15.6.2003*. München
- Bloomfield, B, 1986: *Modelling the World: The Social Constructions of Systems Analysts*. Oxford: Basil Blackwell
- BMBF (Hg), 2000: 10 Jahre Deutsche Ozonforschung 1989-1999. Worms: Verlag für Marketing und Kommunikation
- BMBF, 2004: Bundesbericht Forschung 2004. Bonn
- Boch, R, 2002: Die Global Player des Klimawissens: Die Herausbildung der internationalen Klimaforschung, in: W. Hauser (Hg), *Klima. Das Experiment mit dem Planeten Erde. Begleitband und Katalog zur Sonderausstellung des Deutschen Museums vom 7.11.2002 bis 15.6.2003*. München
- Böhme, G. et al, 1972: Alternativen in der Wissenschaft, *Zeitschrift für Soziologie* 1: 302-316
- Böhme, G. et al, 1973: Die Finalisierung der Wissenschaft, *Zeitschrift für Soziologie* 2: 128-144
- Böhme, G. et al, 1978: Die gesellschaftliche Orientierung des wissenschaftlichen Fortschritts. Frankfurt: Suhrkamp
- Böhmer-Christiansen, S, 1993: Science Policy, the IPCC, and the climate convention, *Energy and Environment* 4: 362-406
- Böhmer-Christiansen, S, 1994a: Global climate protection policy: the limits of scientific advice. Part 1, *Global Environmental Change* 4: 140-159
- Böhmer-Christiansen, S, 1994b: Global climate protection policy: the limits of scientific advice. Part 2, *Global Environmental Change* 4: 185-200
- Böschen, S, 2000: Risikogenese. Opladen: Leske + Budrich
- Brasseur, G. et al. (Hg), 1999: *Atmospheric Chemistry and Global Change*. New York: Oxford University Press
- Cagin, S, Dray, P, 1993: *Between Earth and Sky: How CFCs Changed our World and Endangered the Ozone Layer*. New York: Pantheon
- Christy, J, Spencer, R, 2005: Correcting temperature data sets, *Science* 310: 972
- Chubin, D, 1976: The Conceptualization of Scientific Specialities, *the Sociological Quarterly* 17: 448-476
- Clark, W./The Social Learning Group, 2001: *Learning to Manage Global Environmental Risks*. Cambridge: MIT Press
- Cohen, H.F, 1994: *The Scientific Revolution: A Historiographical Inquiry*. Chicago: University of Chicago Press
- Collins, H, 1985: *Changing Order*. London: Sage
- Conrad, J, 1980: Bürgerinitiativen und wissenschaftliche Expertise. Strukturveränderungen der Wissenschaft durch die Kernenergie-debatte? Arbeitsbericht, Frankfurt
- Conrad, J, 1995: Greenfreeze: Environmental Success by Accident and Strategic Action, in: M. Jänicke, H. Weidner (Hg), *Successful Environmental Policy*. Berlin: edition sigma
- Conrad, J, 1998: Umweltsoziologie und das soziologische Grundparadigma, in: K-W. Brand (Hg), *Soziologie und Natur. Theoretische Perspektiven*. Opladen: Leske + Budrich
- Conrad, J, 1999: Problem Oriented Research and the Question of Interdisciplinarity. FFU-Report 99-7, Berlin
- Conrad, J, 2002: Limitations to interdisciplinarity in problem oriented social science research, *The Journal of Transdisciplinary Environmental Studies* 1 (1): 55-69
- Conrad, J, 2007: Wissenschaftsdynamik, Community- und Disziplinbildungsprozesse in der Klimaforschung. Report TU Dresden

- Conrad, J., 2008a: Von Arrhenius zum IPCC. Wissenschaftliche Dynamik und disziplinäre Verankerungen der Klimaforschung. Münster: Monsenstein und Vannerdat
- Conrad, J., 2008b: Von der Entdeckung des Ozons bis zum Ozonloch. Disziplinäre Verankerungen theoretischer Erklärungen in der Ozonforschung. Schriftenreihe des IÖW 190/08. Berlin: Eigenverlag
- Conrad, J., 2009a: Zur Wechselwirkung von Klimatheorie und Forschungsorganisation, in: J. Halfmann (Hg), Organisationen der Forschung: der Fall der Atmosphären- und Klimawissenschaften. Wiesbaden: VS-Verlag
- Conrad, J., 2009b: Sozialwissenschaftliche Analyse von Klimaforschung, -diskurs und -politik am Beispiel des IPCC, in: M. Voss (Hg), Der Klimawandel. Sozialwissenschaftliche Perspektiven. Wiesbaden: VS-Verlag
- Conrad, J. et al., 2009: Wissenschaftsdynamik: disziplinäre Entwicklungen am Beispiel der Ozonforschung. Münster: Monsenstein und Vannerdat (in Vorbereitung)
- Cook, E., 1996: Ozone Protection in the United States: Elements of Success. Washington DC: World Resources Institute
- Crutzen, P., 1996: Mein Leben mit O₃, NO_x und anderen YZO_x-Verbindungen (Nobel-Vortrag), *Angewandte Chemie* 108: 1878-1898
- Crutzen, P., Ramanathan, V., 2000: The ascent of atmospheric sciences, *Science* 290: 299-304
- Daele, W. van den, Krohn, W., 1975: Theorie und Strategie – zur Steuerbarkeit wissenschaftlicher Entwicklung, in: P. Weingart (Hg), *Wissenschaftsforschung*. Frankfurt: Campus
- Daele, W. van den, Weingart, P., 1975: Resistenz und Rezeptivität der Wissenschaft - Zu den Entstehungsbedingungen neuer Disziplinen durch wissenschaftspolitische Steuerung, *Zeitschrift für Soziologie* 4: 146-164
- Daele, W. van den, et al. (Hg), 1979: Geplante Forschung. Vergleichende Studien über den Einfluss politischer Programme auf die Wissenschaftsentwicklung. Frankfurt: Suhrkamp
- Dessler, A., Parson, E., 2006: *The Science and Politics of Global Climate Change. A Guide to Debate*. Cambridge: Cambridge University Press
- Dotto, L., Schiff, H., 1978: *The Ozone War*. Barden City, NY: Doubleday & Co
- Edenhofer, O. et al., 2006: Induced technological change: Exploring its implications for the economics of atmospheric stabilization. Synthesis Report from the Innovation Modeling Comparison Project, *Energy Journal*, Special Issue Endogenous Technological Change and the Economics of Atmospheric Stabilization: 57-107
- Edwards, P., 1999: Global climate science, uncertainty and politics: data-laden models, model-filtered data, *Science as Culture* 8 (4): 437-472
- Edwards, P., 2000: The world in a machine: Origins and impacts of early computerized global systems models, in: T.P. Hughes, A.C. Hughes (Hg), *Systems, Experts, and Computers. The Systems Approach in Management and Engineering, World War II and After*. Cambridge: MIT Press
- Edwards, P., 2001: Representing the global atmosphere: Computer models, data, and knowledge about climate change, in: C. Miller, P. Edwards (Hg), *Changing the Atmosphere. Expert Knowledge and Environmental Governance*. Cambridge: MIT Press
- Edwards, P., 2002: Modelle, Daten, Ungewissheit und die Politik in der weltweiten Klimawissenschaft, in: W. Hauser (Hg), *Klima. Das Experiment mit dem Planeten Erde. Begleitband und Katalog zur Sonderausstellung des Deutschen Museums vom 7.11.2002 bis 15.6.2003*. München
- Edwards, P., 2007: *The World as a Machine: Computer Models, Data Networks, and Global Atmospheric Politics*. Cambridge: MIT Press
- Edwards, P., Schneider, S., 1997: The 1995 IPCC Report: Broad consensus or „scientific cleansing“?, *Ecofable/Ecoscience* 1 (1): 3-9
- Edwards, P., Schneider, S., 2001: Self-governance and peer review in science-for-policy: the case of the IPCC Second Assessment Report, in: C. Miller, P. Edwards (Hg), *Changing the Atmosphere. Expert Knowledge and Environmental Governance*. Cambridge: MIT Press
- Elzinga, A., 1996: Shaping worldwide consensus: The orchestration of global change research, in: A. Elzinga, C. Landström (Hg), *Internationalism and Science*. London: Taylor and Francis
- Elzinga, A., 1997: The science-society contract in historical transformation: With special reference to „epistemic drift“, *Social Science Information* 36: 411-445
- EU-Commission, 2001: *European Research in the Stratosphere 1996 – 2000. Advances in our understanding of the ozone layer during THESEO*. EUR 19867, Brüssel
- Fabian, P., 2002: *Leben im Treibhaus. Unser Klimasystem - und was wir daraus machen*. Berlin: Springer
- Fabian, P., Menzel, A., 2002: Pflanzen und Tiere als Boten des Klimawandels, in: W. Hauser (Hg), *Klima. Das Experiment mit dem Planeten Erde. Begleitband und Katalog zur Sonderausstellung des Deutschen Museums vom 7.11.2002 bis 15.6.2003*. München
- Farrell, A., 2005: Learning to see the invisible: discovery and measurement of ozone, *Environmental Monitoring and Assessment* 106: 59-80
- Farrell, A., Jäger, J. (Hg), 2006: *Assessments of Regional and Global Environmental Risks. Designing Processes for the Effective Use of Science in Decision Making*. Baltimore: RFF Press
- Fleagle, R., 1992: From the International Geophysical Year to global change, *Reviews of Geophysics* 30 (4): 305-313
- Fleagle, R., 1994: *Global Environmental Change. Interactions of Science, Policy, and Politics in the United States*. Westport: Praeger
- Fleming, J.R., 1998: *Historical Perspectives on Climate Change*. Oxford: Oxford University Press

- Franz, W, 1997: The Development of an International Agenda for Climate Change: Connecting Science to policy. ENRP Discussion Paper E-97-07. Cambridge: Harvard University
- Funtowicz, S, Ravetz, J, 1993a: Science for the post-normal age, *Futures* 25: 739-754
- Funtowicz, S, Ravetz, J, 1993b: The emergence of post-normal science, in: R. von Schomberg (Hg), *Science, Politics, and Morality. Scientific Uncertainty and Decision Making*. Dordrecht: Kluwer
- Geerts, B, 1999: Trends in atmospheric science journals, *Bulletin of the American Meteorological Society* 80: 639-652
- Gehring, T, 1994: *Dynamic International Regimes: Institutions for International Environmental Governance*. Frankfurt: Peter Lang
- Gelbspan, R, 2004: *Boiling Point. How Politicians, Big Oil and Coal, Journalists, and Activists Are Fueling the Climate Crisis - and What You Can Do to Avert Disaster*. New York: Basic Books
- Gibbons, M. et al, 1994: *The New Production of Knowledge. The Dynamics of Science and Research in Contemporary Societies*. London: Sage
- Gläser, J, 2006: *Wissenschaftliche Produktionsgemeinschaften. Die soziale Ordnung der Forschung*. Frankfurt: Campus
- Graedel, Th, Crutzen, P, 1994: *Chemie der Atmosphäre. Bedeutung für Klima und Umwelt*. Heidelberg: Spektrum Akademie Verlag
- Gramelsberger, G, 2004: *Computersimulationen in den Wissenschaften. Neue Instrumente der Wissensproduktion. Explorationsstudie*. Berlin: BBAW
- Gramelsberger, G, 2007: *Computereperimente in der Klimaforschung. Zwischenbericht*, Berlin
- Grundmann, R, 1999: *Transnationale Umweltpolitik zum Schutz der Ozonschicht. USA und Deutschland im Vergleich*. Frankfurt: Campus
- Grundmann, R, 2001: *Transnational Environmental Policy: Reconstructing Ozone*. London: Routledge
- Grundmann, R, 2005: Ozone and climate: scientific consensus and leadership, *Science, Technology and Human Values* 31: 73-101
- Grundmann, R, 2007: Climate change and knowledge politics, *Environmental Politics* 16: 414-432
- Guntau, M, Laitko, H, 1987: Entstehung und Wesen wissenschaftlicher Disziplinen, in: M. Guntau; H, Laitko (Hg), *Der Ursprung der modernen Wissenschaften. Studien zur Entstehung wissenschaftlicher Disziplinen*. Berlin: Akademie Verlag
- Guston, D.H, 2000: *Between Politics and Science: Assuring the Integrity and Productivity of Research*. Cambridge: Cambridge University Press
- Guston, D.H, 2001: Boundary organizations in environmental policy and science: an introduction, *Science, Technology and Human values* 26: 399-408
- Haagen-Smit, A. et al, 1953: Ozone formation in photochemical oxidation of organic substances, *Ind. Eng. Chem.* 45 (9): 2086-2089
- Haas, P. et al. (Hg), 1993: *Institutions for the Earth : Sources of Effective International Environmental Protection*. Cambridge: MIT Press
- Halfmann, J. (Hg), 2008: *Organisation der Forschung: der Fall der Atmosphären- und Klimawissenschaften*. Wiesbaden: VS-Verlag (in Vorbereitung)
- Halfmann, J. et al, 2003: *Problemorientierte Forschung und wissenschaftliche Dynamik. Das Beispiel der Klimaforschung. Forschungsantrag*, Dresden
- Halfmann, J. et al, 2008: *Problemorientierte Forschung und wissenschaftliche Dynamik. Das Beispiel der Klimaforschung. Endbericht*, Dresden
- Hansen, J, 1988: *The Greenhouse Effect: Impacts on Current Global Temperature and Regional Heat Waves. Testimony to US Senate, Committee on Energy and Natural Resources, June 23, 1988, Washington DC*
- Hansen, J, 1994: *Public Understanding of Global Climate Change, Comments at a Symposium in Honor of Carl Sagan's 60th Birthday*
- Hansen, J. et al, 1981: Climate impact of increasing atmospheric carbon dioxide, *Science* 213: 957-966
- Hart, D, 1992: *Strategies of Research Policy Advocacy: Anthropogenic Climate Change Research, 1957-1974. Report 92-08*. Cambridge: Harvard University.
- Hart, D, Victor, D, 1993: Scientific elites and the making of US policy for climate change research, 1957-74, *Social Studies of Science* 23: 643-680
- Healy, S, 2005: *IPCC cross-cutting themes, organizational learning and the resilience of the climate regime*. Ms. Sydney
- Heckhausen, H, 1987: >Interdisziplinäre Forschung< zwischen Intra-, Multi- und Chimären-Disziplinarität, in: J. Kocka (Hg), *Interdisziplinarität: Praxis - Herausforderung - Ideologie*. Frankfurt: Suhrkamp
- Hiller, P, 2009: *Grenzorganisationen und funktionale Differenzierung*, in: J. Halfmann (Hg), *Organisation der Forschung: der Fall der Atmosphären- und Klimawissenschaften*. Wiesbaden: VS-Verlag
- Hinkel, J, Klein, R, 2006: Integrating knowledge for assessing coastal vulnerability to climate change, in: L. McFadden et al. (Hg), *Managing Coastal Vulnerability: An Integrated Approach*. Amsterdam: Elsevier
- Hunter, J, 1980: The national system of scientific measurement, *Science* 210: 869-874
- Ingram, H, Mintzer, C, 1990: How atmospheric research changed the political climate, in: F. Furkhart et al. (Hg), *Global Climate Change: The Meeting of Science And Policy. Issue Paper 1 from the Proceedings of „Understanding Global Change and Arizona“ 1989*. Tucson: University of Arizona
- IPCC (Hg), 1990: *Climate Change. The IPCC Assessment*. Cambridge: Cambridge University Press
- IPCC (Hg), 1992: *Climate Change 1992. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment*. Cambridge: Cambridge University Press

- IPCC Secretariat, 1993: IPCC Procedures for Preparation, Review, Acceptance, Approval, and Publication of its Reports. <http://www.usgcrp.gov/ipcc/html/rulespro.html>
- IPCC (Hg), 1995: Climate Change 1994: Radiative Forcing of Climate Change and An Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios. Cambridge: Cambridge University Press
- IPCC (Hg), 1996a: Climate Change 1995. The Science of Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press
- IPCC (Hg), 1996b: Climate Change 1995: Economic and Social dimensions of Climate Change. Second Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press
- IPCC (Hg), 1999a: Special Report on Aviation and the Global Atmosphere. Cambridge: Cambridge University Press
- IPCC, 1999b: Appendix A to the Principles Governing IPCC Work. Procedures for the preparation, review, acceptance, adoption, approval and publication of IPCC reports, Adopted at the Fifteenth Session (San Jose, 15-18 April 1999), amended at the Twentieth Session (Paris, 19-21 February 2003) and Twenty-first Session (Vienna, 3 and 6-7 November 2003)
- IPCC (Hg), 2000: Special Report on Emissions Scenarios. Cambridge: Cambridge University Press
- IPCC (Hg), 2001a: Climate Change 2001: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press
- IPCC (Hg), 2001b: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press
- IPCC (Hg), 2001c: Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press
- IPCC (Hg), 2001d: Climate Change 2001: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Third Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press
- IPCC (Hg), 2005: Carbon Dioxide Capture and Storage. Cambridge: Cambridge University Press
- IPCC (Hg), 2007a: Climate Change: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press
- IPCC (Hg), 2007b: Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Cambridge: Cambridge University Press
- IPCC (Hg), 2007c: Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press (im Druck)
- IPCC/TEAP (Hg), 2005: Special Report on Safeguarding the Ozone Layer and Global Climate System, Cambridge
- Johnston, H, 1992: Atmospheric ozone, Annual Review of Physical Chemistry 43: 1-32
- Kasperson, J, Kasperson, R. (Hg), 2000: Global Environmental Risk. Tokyo: United Nations University Press
- Keohane, R, Levy, M, 1996: Institutions for Environmental Aid. Cambridge, MIT Press
- Knorr Cetina, K, 1992: Zur Unterkomplexität der Differenzierungstheorie. Empirische Anfragen an die Systemtheorie, Zeitschrift für Soziologie 21: 406-419
- Krohn, W, Daele, W. van den, 1998: Science as an agent of change: finalization and experimental implementation, Social Science Information 37: 191-222
- Krohn, W, Schäfer, W, 1978: Ursprung und Struktur der Agrikulturchemie, in: G. Böhme et al, Die gesellschaftliche Orientierung des wissenschaftlichen Fortschritts. Frankfurt: Suhrkamp
- Kuhn, T, 1973: Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen. Frankfurt: Suhrkamp
- Küppers, G. et al, 1978: Umweltforschung - die gesteuerte Wissenschaft? Frankfurt: Suhrkamp
- Lahsen, M, 2002: Brazilian Climate Epistemers' Multiple Epistemes: An Exploration of Shared Meaning, Diverse Identities and Geopolitics in Global Change Science. BCSIA Discussion Paper 2002-01. Cambridge: Harvard University
- Lamb, H, 1997: Through All the Changing Scenes of Life: A Meteorologist's Tale. Norfolk: Taverner
- Lambright, W.H, 2005: NASA and the Environment. The Case of Ozone Depletion. Monographs in Aerospace History 38. NASA SP-2005-4538. Washington DC: NASA
- Latour, B, 1983: Give me a laboratory and I will raise the world, in: K. Knorr-Cetina, M. Mulkay (Hg), Science observed: Perspectives on the Social Study of Science. London: Sage
- Lemke, P, 2002: Was unser Klima bestimmt: Einsichten in das System Klima, in: W. Hauser (Hg), Klima. Das Experiment mit dem Planeten Erde. Begleitband und Katalog zur Sonderausstellung des Deutschen Museums vom 7.11.2002 bis 15.6.2003. München
- Le Prestre, P. et al. (Hg), 1998 : Protecting the Ozone Layer: Lessons, Models, and Prospects. Dordrecht: Kluwer
- Lieckweg, T, 2001: Strukturelle Kopplung von Funktionssystemen „über“ Organisation, Soziale Systeme 7: 267-289
- Lifitin, K, 1994: Ozone Discourses: Science and Politics in Global Environmental Cooperation. New York: Columbia University Press
- Luhmann, N, 1968: Selbststeuerung der Wissenschaft, Jahrbuch für Sozialwissenschaft 19: 147-170
- Luhmann, N, 1990: Die Wissenschaft der Gesellschaft. Frankfurt: Suhrkamp
- McCright, A, Dunlap, R, 2003: Defeating Kyoto: The Conservative Movement's Impact on U.S. Climate Change Policy, Social Problems 50 (3): 348-373
- Mears, C. et al, 2003: A reanalysis of the MSU channel 2 tropospheric temperature record, Journal of Climate 16: 3650-3664
- Merton, R, 1968: Social Theory and Social Structure. New York: Free Press
- Miller, C, 2004: Climate science and the making of a global political order, in: S. Jasanoff (Hg), States of Knowledge: The Co-Production of Science and Social Order. London: Routledge
- Miller, C, 2005: Standards and community among greenhouse gas scientists. Ms. Madison

- Miller, C, Edwards, P. (Hg), 2001: Changing the Atmosphere. Expert Knowledge and Environmental Governance. Cambridge: MIT Press
- Miller, C. et al, 1981: A two-dimensional model of stratospheric chemistry and transport, *Journal of Geophysical Research* 86 (C12) : 12039-12065
- Mitchell, R. et al. (Hg), 2006: Global Environmental Assessments: Information and Influence. Cambridge: MIT Press
- Molina, M, Rowland, F, 1974: Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalyzed destruction of ozone, *Nature* 249 (5460): 810-812
- Moss, R.H, 2000: Ready for IPCC-2001: Innovation and change in plans for the IPCC Third Assessment Report, *Climatic Change* 45: 459-468
- Nebeker, F, 1995: Calculating the Weather. Meteorology in the 20th Century. London: Academic Press
- Norton, S, Suppe, F, 2001: Why atmospheric modelling is good science, in: C. Miller, P. Edwards (Hg), Changing the Atmosphere. Expert Knowledge and Environmental Governance. Cambridge: MIT Press
- Nowotny, H. et al, 2001: Re-Thinking Science. Knowledge and the Public in an Age of Uncertainty. Cambridge: Polity Press
- Oberthür, S, 1993: Politik im Treibhaus. Die Entstehung des internationalen Klimaschutzregimes. Berlin: edition sigma
- Oberthür, S, 1997: Umweltschutz durch internationale Regime. Opladen: Leske + Budrich
- Oberthür, S, Ott, H, 1999: The Kyoto Protocol. International Climate Policy for the 21st Century. Berlin: Springer
- O'Riordan, T, Jäger, J. (Hg), 1996: Politics of Climate Change: A European Perspective. London: Routledge
- Parry, M, Carter, T, 1998: Climate Impact and Adaptation Assessment. London: Earthscan
- Parson, E, 2003: Protecting the Ozone Layer: Science and Strategy. New York: Oxford University Press
- PIK, 2003: INTEGRATION (Integrated Assessment of Changes in the Thermohaline Circulation. An Interdisciplinary Research Project. Potsdam
- Poloni, V, 2006: Grenzorganisationen der Klimaforschung. Ms. Dresden
- Ravetz, J, 1973: Die Krise der Wissenschaft. Neuwied: Luchterhand
- Rayner, S, Malone E. (Hg), 1998: Human Choice and Climate Change. 4 Volumes. Ohio: Battelle Press
- Revelle, R, Suess, H, 1957: Carbon dioxide exchange between atmosphere and ocean and the question of an increase of atmospheric CO₂ during the past decades, *Tellus* 9: 18-27
- Roan, S, 1990: Ozone Crisis. New York: Wiley & Sons
- Röbbecke, M, et al, 2004: Inter-Disziplinieren. Erfolgsbedingungen von Forschungskoope-rationen. Berlin: edition sigma
- Root, T. et al, 2005: Human-modified temperatures induce species changes: Combined attribution, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 102 (21): 7465-7469
- Sarewitz, D, 2004: How science makes environmental controversies worse, *Environmental Science & Policy* 7: 385-403
- Schimank, U, 2005: Differenzierung und Integration der modernen Gesellschaft. Beiträge zur akteurzentrierten Differenzierungstheorie 1. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissen-schaften
- Schimank, U, 2006: Teilsystemische Autonomie und politische Gesellschaftssteuerung. Beiträge zur akteurzentrierten Differenzierungs-theorie 2. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften
- Schneider, S, 1983: CO₂, climate and society: a brief overview, in: R.S. Chen et al. (Hg), *Social Science Research and Climate Change: An Interdisciplinary Appraisal*. Boston: Reidel
- Schneider, S, 1989: *Global Warming: Are We Entering the Greenhouse Century?* New York: Vintage Books
- Schneider, S, 1997: *Laboratory Earth: the Planetary gamble We Can't Afford to Lose*. New York: Basic Books
- Schneider, S, 2002: Modeling climate change impacts and their related uncertainties, in: R.N. Cooper, R. Layard (Hg), *What the future Holds: Insights from Social Sciences*. Cambridge: MIT Press
- Schneider, S. et al. (Hg), 2002: *Climate Change Policy. A Survey*. Washington DC: Island Press
- Siebenhüner, B, 2006: Can assessments learn? And if so, how? A study of the IPCC, in: A. Farrell, J. Jäger (Hg), *Assessments of Regional and Global Environmental Risks. Designing Processes for the Effective Use of Science in Decision Making*. Balti-more: RFF Press
- Skodvin, T, 1999: Science-policy interaction in the global greenhouse. Cicero Working Paper 1999:3, Oslo
- Skolnikoff, E.B, 1997: Same science, differing policies: the saga of global climate change, MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change, Report 22
- Solomon, S, 1999: Stratospheric Ozone depletion: A Review of Concepts and History, *Reviews of Geophysics* 37: 275-316
- Spencer, R, Christy, J, 1990: Precise monitoring of global temperature trends from satellites, *Science* 247: 1558-1562
- Stanhill, G, 1999: Climate change science is now big science, *Eos, Transactions of the American Geophysical Union* 80 (35): 396-397
- Stehr, N, Storch, H. von, 2003: Climate as Resource, Climate as Risk. Ms. Hamburg
- Stern, N. (Hg), 2007: *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. Cambridge University Press
- Stichweh, R, 1984: Zur Entstehung des modernen Systems wissenschaftlicher Disziplinen. *Physik in Deutschland 1740-1890*. Frankfurt: Suhrkamp
- Stichweh, R, 1992: The sociology of scientific disciplines: on the genesis and stability of the disciplinary structure of modern science, *Science in Context* 5: 3-15

- Stichweh, R., 2003: Differentiation of scientific disciplines: Causes and consequences, in: UNESCO (Hg), Encyclopedia of Life Support Systems. Paris: EOLSS Publishers
- Stolarski, R., 2001: History of the study of atmospheric ozone, *Ozone-Sci. Eng.* 23 (6): 421-428
- Storch, H. von et al, 1999: *Das Klimasystem und seine Modellierung*. Berlin: Springer
- Storch, H. von et al, 2004: Reconstructing past climate from noisy data, *Science* 306: 679-682
- Trenberth, K, Shea, D, 2006: Atlantic hurricanes and natural variability in 2005, *Geophysical Research Letters* 33, L12704, doi: 10.1029/2006GL026984
- US Climate Change Science Program and the Subcommittee of Global Change Research, 2003: *Strategic Plan for the U.S. Climate Change Science Program*. Washington DC
- Victor, D, 2001: *The Collapse of the Kyoto Protocol and the Struggle to Slow Global Warming*. Princeton: Princeton University Press
- Victor, D. et al, 1998: *The Implementation and Effectiveness of International Environmental Commitments: Theory and Practice*. Cambridge: MIT Press
- Vinnikov, K. et al, 2006: Temperature trends at the surface and in the troposphere, *Journal of Geophysical Research* 111, D03106, doi: 10.1029/2005JD005392
- Weart, S, 2003: *The Discovery of Global Warming*. Cambridge: Harvard University Press
- Weart, S, 2005: *The Discovery of Global Warming; extended version*, <http://www.aip.org/history/climate>
- Weingart, P, 1976: *Wissensproduktion und soziale Struktur*. Frankfurt: Suhrkamp
- Weingart, P, 2001: *Die Stunde der Wahrheit? Zum Verhältnis der Wissenschaft zu Politik, Wirtschaft und Medien in der Wissensgesellschaft*. Weilerswist: Velbrück Wissenschaft
- Wellington, F. et al, 2007: *Scaling Up: Global Technology Deployment to Stabilize Emissions*. Washington DC: World Resources Institute
- Willke, H, 1989: *Systemtheorie entwickelter Gesellschaften. Dynamik und Riskanz moderner gesellschaftlicher Selbstorganisation*. Weinheim: Juventa
- WMO, 1986: *Atmospheric Ozone: 1985*, 3 Volumes. Global Ozone Research and Monitoring Project. Report 16. Genf
- WMO, 1989: *Scientific Assessment of Stratospheric Ozone: 1989*. Global Ozone Research and Monitoring Project. Report 20. Genf
- WMO, 1992: *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1991*. Global Ozone Research and Monitoring Project. Report 25. Genf
- WMO, 1995: *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1994*. Global Ozone Research and Monitoring Project. Report 37. Genf
- WMO, 1998: *Stratospheric Processes and their Role in Climate (SPARC)*. Ozone Research and Monitoring Project. Report 43. Genf
- WMO, 1999: *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1998*. Global Ozone Research and Monitoring Project. Report 44. Genf
- WMO, 2003: *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2002*. Global Ozone Research and Monitoring Project. Report 47. Genf
- WMO, 2007: *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006*. Global Ozone Research and Monitoring Project. Report 50. Genf
- Young, O. (Hg), 1999: *The Effectiveness of International Environmental Regimes: Causal Connections and Behavioral Mechanisms*. Cambridge: MIT Press
- Young, O, 2002: *The Institutional Dimensions of Environmental Change. Fit, Interplay, and Scale*. Cambridge: MIT Press

GESCHÄFTSTELLE BERLIN

MAIN OFFICE

Potsdamer Straße 105

10785 Berlin

Telefon: + 49 – 30 – 884 594-0

Fax: + 49 – 30 – 882 54 39

BÜRO HEIDELBERG

HEIDELBERG OFFICE

Bergstraße 7

69120 Heidelberg

Telefon: + 49 – 6221 – 649 16-0

Fax: + 49 – 6221 – 270 60

mailbox@ioew.de

www.ioew.de