Jobst Conrad

Von der Entdeckung des Ozons bis zum Ozonloch

Disziplinäre Verankerungen theoretischer Erklärungen in der Ozonforschung

Schriftenreihe des IÖW 190/08

i | ö | w
INSTITUT FÜR
ÖKOLOGISCHE WIRTSCHAFTSFORSCHUNG

Jobst Conrad

Von der Entdeckung des Ozons bis zum Ozonloch

Disziplinäre Verankerungen theoretischer Erklärungen in der Ozonforschung

Schriftenreihe des IÖW 190/08
Berlin, Dezember 2008

ISBN 978-3-932092-93-0

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 2005 erstellte Studie entstand im Rahmen 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. Sie erscheint in stark gekürzter Fassung (voraussichtlich 2009) auch in dem Buch „Wissenschaftsdynamik: disziplinäre Entwicklungen am Beispiel der Ozonforschung“ von Conrad, Halfmann, Poloni und Schützenmeister (Münster: Monsenstein und Vannerdat).

Zusammenfassung

Diese Studie rekonstruiert die Entwicklung der stratosphärischen Ozonforschung von der Entdeckung des Ozons 1839 bis zum Nachweis, zur Erklärung und zum angestrebten Stopp des katalytischen Ozonabbaus und der Rückbildung des antarktischen Ozonlochs. Sie resümiert die wesentlichen die Ozonforschung konstituierenden Themen, Erfahrungsgegenstände, Methoden, Erklärungen, Modelle, Theorien und deren Entwicklung, zeigt etwaige wissenschaftliche Kontroversen und ihre Schließungen auf, arbeitet die Grundstruktur dieser problemorientierten Forschung und ihre Einbettung in die Klimaforschung, einschließlich ihrer sozialen Strukturmerkmale, heraus und erörtert die disziplinären Bezüge und Verankerungen der in ihr genutzten oder entwickelten Theorien. Als entscheidende Strukturmerkmale problemorientierter Ozonforschung und ihrer disziplinären Verankerungen lassen sich festhalten: Für die lange Zeit eher akademisch geprägte stratosphärische Ozonforschung wurde nach 1970 ein sozial definiertes praktisches Problem Hauptbezugspunkt, nämlich das Risiko eines anthropogen verursachten Ozonabbaus. Die als hinreichend angesehene Erklärung eines konkreten (sozial definierten) Phänomens wie z.B. des Ozonlochs erfolgt durch eine typisch problemorientierte Kombination verschiedener wissenschaftlicher Theorien unterschiedlicher disziplinärer Provenienz. Es bestand von daher keine wirkliche Specialty der Ozonforscher; vielmehr entwickelte sich eine extern forcierte, problembezogene Zusammenarbeit unterschiedlicher fachlicher und themenbezogener Richtungen. Der externe politische Druck zur problemorientierten Kooperation von Ozonforschern zwecks Klärung und Lösung eines Problems (UV-Strahlungseffekte) auf politischer Ebene hatte die positive Wirkung, dass die zuvor getrennt arbeitenden und ihre je eigene (disziplinäre) Perspektive vertretenden Forschungsrichtungen als auch Arbeitsbereiche (zumindest ansatzweise) problemorientiert zusammenarbeiten mussten. Dabei trug diese problemorientierte Kooperation (implizit) dazu bei, den Einfluss bestimmter gesellschaftspolitisch interessierter Problemdeutungen, die in ihrer Darstellung immerhin pseudo-wissenschaftlich rational aufgebaut sind und deren Durchschlagskraft vom Ausmaß der ungeklärten wissenschaftlichen Fragestellungen abhängt, durch autoritative scientific Assessments zurückzudrängen, die mit beträchtlichen Anstrengungen und kooperativen Schließungsprozessen verbunden waren. Im Ergebnis bestätigt die Ozonforschung(sgeschichte) die Aufrechterhaltung und Dominanz disziplinär bestimmter Theorien und deren problemorientierte (finalisierte) Verknüpfbarkeit und Substantiierung, die mehr bedeutet als bloße Theorieanwendung und die zugleich zur Fortentwicklung und Differenzierung (grundlagenorientierter) wissenschaftlicher Forschung gemäß deren Normen beiträgt.

Abstract

This study reconstructs the development of stratospheric ozone research since the discovery of ozone in 1839 until the proof, the explanation and the aspired stop of catalytic ozone depletion and of the recovery of the Antarctic ozone hole. It resumes the main themes, objects of experience, methods, explanations, models, and theories constituting ozone research, and their historical development. It denominates possible scientific controversies and their resolution, elaborates the basic structure of this problem oriented research and its embedding in climate research, including its social characteristics, and discusses the disciplinary references and anchorages of the theories used and developed in ozone research. The following key structural properties of problem oriented ozone research and its disciplinary anchorages can be identified: For stratospheric ozone research which showed a clear academic orientation for a long time a socially defined practical problem be-

came its main point of reference after 1970, namely the risk of anthropogenicly caused ozone depletion. The explanation of a concrete (socially defined) phenomenon such as the ozone hole, which is considered as sufficient, is reached by a typically problem oriented combination of different scientific theories of differing disciplinary origin. So there was no real specialty of ozone researchers; instead, an externally forced, problem oriented cooperation of varied subject and theme related orientations developed. The external political pressure towards problem oriented cooperation of ozone researchers to explain and solve a problem, namely UV radiation effects, at the political level had the positive effect that research fields and orientations, which previously worked separately and each followed their own (disciplinary) perspective, had to cooperate in a (at least partly) problem oriented manner. This problem oriented cooperation (implicitly) contributed to push back the influence of certain sociopolitically interested problem interpretations which are presented in at least pseudo-scientific rational terms and in their efficacity depend on the size of scientifically still unexplained questions, by authoritative assessments which were connected with considerable research efforts and cooperative resolution of controversial issues. As a result (the history of) ozone research confirms the maintenance and dominance of disciplinarily determined theories as well as the feasibility of their problem oriented (finalized) connection and substantiation what is more than mere theory application and contributes to the further development and differentiation of (basic) scientific research according to the norms of these disciplinary theories.

Der Autor

PD 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-(0)30-884594-0

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung und Kontext ... 11

2 Methodische Vorgehensweise und Grenzen ... 12

3 Historischer Überblick ... 16

3.1 Entdeckung des Ozons und Bestimmung seiner Eigenschaften (~1840 - ~1880) ... 18
3.2 Lokalisierung von Ozon in der Stratosphäre und seine Absorption der UV-Strahlung (~1880 - ~ 1930) ... 19
3.3 Theorie und Quantifizierung der atmosphärischen Ozonverteilung (~1930 - ~1965) ... 21
3.4 Katalytischer Ozonabbau (~1965 - ~ 1985) ... 23
3.5 Ozonloch und umfangreiche Ozonforschungsprogramme (~1985 - ~2000) ... 27
3.6 Übergang zu normal science und reduzierter Forschungsförderung (ab ~2000) ... 40

4 Soziale Strukturmerkmale: Forschungsaktivitäten, -programme, -institutionen, -ressourcen ... 44

5 Ergebnisse der (problemorientierten) Ozonforschung ... 57

6 Erklärende Theorien und Modelle und ihr disziplinärer Hintergrund ... 71

7 Kontroversen und Schließungen ... 75

8 Ozonforschung als Bestandteil der Atmosphärenforschung ... 83

9 Wissenschaftssoziologische Ergebnisse und Schlussfolgerungen ... 85

10 Literaturverzeichnis ... 92

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1: Vertikale Ozonkonzentration und Temperaturwerte in der Atmosphäre 20
Abb. 3.2: Bildung und Zerstörung von Ozon aus Sauerstoff.....21
Abb. 3.3: Prognostizierte zusätzliche Fälle von Hautkrebserkrankungen, 1980 – 2100.....28
Abb. 3.4: Schema der dynamischen und chemischen Prozesse, die zur Ozon-zerstörung in antarktischen Polarwirbel führen 30
Abb. 3.5: Beobachtete Gesamtozonwerte in Antarktis, Arktis und Arosa/Schweiz 32
Abb. 3.6: Schematisches Diagramm der entscheidenden stratosphärisches Ozon beeinflussenden Prozesse und ihre Verbindung mit Klimaveränderungen.....36
Abb. 3.7: Weltweite Produktionsmengen ozonzerstörender Substanzen.....39
Abb. 5.1: Trendunterschiede zwischen Ozon-Messreihen für unterschiedliche Höhen 70

Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1: Globale Programme zur Messung und Analyse von Ozon und UV-Strahlung.....34
Tab. 3.2: Globale Ozonbildung, -zerstörung und -nettoproduktion in Regionen der Troposphäre im Sommer.....37
Tab. 5.1: Chemische Schlüsselreaktionen und katalytische Zyklen, Ozon betreffend.....59
Tab. 5.2: Zusammenfassung entscheidender Indizien des Ozonabbaus.....64
Tab. 7.1: Kennzeichen maßgeblicher wissenschaftlicher Kontroversen in verschiedenen Phasen der Ozonforschung.....82

Abkürzungsverzeichnis

AAOE	Airborne Antarctic Ozone Experiment
AWI	Alfred-Wegener-Institut
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CIAP	Climate Impact Assessment Program
CCM	chemistry circulation model (Klima-Chemie-Modell)
CTM	chemistry transport model (Chemie-Transport-Modell)
DU	Dobson Unit(s)
ENVISAT	European Environmental Satellite
EPA	Environmental Protection Agency
ERS-2	Earth Remote Sensing satellite
ESA	European Space Administration
EU	European Union (Europäische Union)
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoff
FTIR	Fourier Transform Infrared spectrometer
GAW	Global Atmospheric Watch
GCM	general circulation model (globales Zirkulationsmodell)
GEF	Global Environment Facility
GHG	greenhouse gas(es) (Treibhausgas(e))
GOME	Global Ozone Monitoring Experiment
GTZ	Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit
GWP	Global Warming Potential
HALO	zukünftiges Forschungsflugzeug für die Atmosphären- und Klimaforschung
HALOE	HALogen Occultation Experiment
HFCKW	teilhalogenierter Fluorchlorkohlenwasserstoff
HFKW	teilhalogenierter Fluorkohlenwasserstoff
IAMAP	International Association of Meteorology and Atmospheric Physics
IASI	Infrared Atmospheric Sounding Interferometer
IMOS	Federal Interagency Task Force on Inadvertent Modification of the Stratosphere
IOC	International Ozone Commission
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IRS	International Radiation Society (Internationale Strahlungskommission)
IUGG	Internationale Union für Geodäsie und Geophysik
Lidar	Light Detection and Ranging
MIPAS	Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding
MLS	Microwave Limb Sounder
NAO	nordatlantische Oszillation
NAS	National Academy of Sciences
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NAT	nitric acid trihydrate (Salpetersäure-Trihydrat)
NGO	nongovernmental organization
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Association
NOZE	National Ozone Expedition
NRC	National Research Council
NSDC	Network for Detection of Stratospheric Change
ODP	Ozone Depletion Potential
ODS	Ozone Depleting Substances

OECD	Organisation for Economic Cooperation and Development
OMPS	Ozone Mapping and Profiling Suite
ppmv	parts per million by volume
ppmb	parts per billion by volume
ppmt	parts per trillion by volume
PSC	polar stratospheric cloud
SAGE	Stratospheric Aerosol and Gas Experiment
SBUV	Solar Backscatter Ultraviolet Instrument
SCEP	Study of Critical Environmental Problems
SPARC	Stratospheric Processes and their Role in Climate
SSBUV	Space Shuttle SBUV
SST	supersonic transport aircraft
STOIC	Stratospheric Ozone Intercomparison Campaign
TEAP	Technology and Economic Assessment Panel
TOMS	Total Ozone Monitoring Spectrometer
UK	United Kingdom
UN	United Nations
UNEP	United Nations Environment Programme
USA	United States of America
UV	ultraviolet
WDSC	World Data Centre for Surface Ozone
WHO	World Health Organization
WMO	World Meteorological Organization
WOUDC	World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre

1 Einführung und Kontext

Diese Studie wurde im Rahmen des vom BMBF geförderten Forschungsvorhabens „Problemorientierte Forschung und wissenschaftliche Dynamik. Das Beispiel der Klimaforschung“ (vgl. Halfmann et al. 2003) als Einstieg in das Teilprojekt „Wissenschaftsdynamik der Klimaforschung“ erstellt. Dessen Leitfrage lautet: Entwickelt sich die Klimaforschung zu einer wissenschaftlichen Disziplin (vgl. Conrad 2005, 2007, 2008)?

Die atmosphärische Ozonforschung wurde dabei als Einstieg in die wissenschaftshistorische Rekonstruktion der Klimaforschung genutzt, weil das Ozonproblem (1) via Ozonregime und Ozonforschungsprogrammen als ein wesentlicher Auslöser für die Expansion der Klimaforschung aufgrund ihrer politisch motivierten intensiven Förderung und Finanzierung fungierte[1], weil es (2) mit einem interessanten theorierelevanten Schließungsprozess in einer (nicht nur) wissenschaftlichen Kontroverse einherging (vgl. Halfmann/Schützenmeister 2002), und weil (3) eine quasi naturwüchsige Entwicklung der Forschungsfronten etwa von reiner Ozonforschung hin zu komplexen, möglichst alle relevanten Variablen berücksichtigenden Modellen stattgefunden hat, um zu einem angemessenen Verständnis des Klimageschehens (auch im Bereich von atmosphärischer Ozonbildung, -abbau und -dynamik) zu gelangen.

Zentrale Aufgabe der Studie ist somit,

- die wesentlichen die Ozonforschung konstituierenden Themen, Erfahrungsgegenstände, Gegenstandsaspekte, Methoden, Erklärungen, Modelle, Theorien und deren Entwicklung zu resümieren,
- etwaige wissenschaftliche Kontroversen und ihre Schließungen aufzuzeigen,
- die (logische Stringenz der) Grundstruktur dieser problemorientierten Forschung und ihre Einbettung in die Klimaforschung einschließlich ihrer sozialen Strukturmerkmale herauszuarbeiten
- und die disziplinären Bezüge und Verankerungen der in ihr genutzten oder entwickelten Theorien zu erörtern.

Während sozialwissenschaftliche Arbeiten bislang vor allem Ozonpolitik und Ozonregime untersuchten und dabei durchaus auch die Rolle der Wissenschaft(ler) thematisierten[2] (vgl. Anderson/Sarma 2002, Benedick 1991, Canan/Reichman 2002, Cagin/Dray 1993,

1 Politik puscht und prägt die Forschungsprogramme der Klimaforschung (wie in anderen Forschungsgebieten) deutlich mit, kann deren (kognitive) Ergebnisse, und damit eventuelle Disziplinbildungsprozesse jedoch bestenfalls indirekt beeinflussen, so dass sie bei der Analyse auf Geltungsebene (zunächst) nicht berücksichtigt zu werden braucht. Ob solche wissenschaftsexternen Einflüsse letztlich auch auf die Struktur der Theoriebildung in der Klimaforschung durchschlagen (können), wie Untersuchungen mancher problemorientierter Forschungsgebiete nahe legen (vgl. z.B. Halfmann 1984, Krohn/Schäfer 1978), ist dementsprechend eine zentrale Frage dieses Forschungsvorhabens.

2 Generell sind Klimapolitik, internationale Umweltregime und auch die Klimaforschung seit den 1980er Jahren zunehmend ins Blickfeld sozialwissenschaftlicher Analysen geraten (vgl. exemplarisch Clark/Munn 1986, Clark/The Social Learning Group 2001, Haas 1990, Haas et al.1993, Kasperson/Kasperson 2000, Kay/Jacobson 1983, Keohane/Levy 1996, Kopfmüller/Coenen 1997, Lipschutz/Conca 1993, Miller/Edwards 2001, Mitchell et al. 2006, Oberthür 1993, 1997, Oberthür/Ott 1999, O’Riordan/Jäger 1996, Rayner/Malone 1998, Turner et al. 1992, Weingart et al. 2002, Young 1999)

Grundmann 1999, 2001, Le Prestre et al. 1998, Liftin 1994, Parson 2003), behandeln einige Veröffentlichungen auch vorrangig den Prozess der (sozialen) Genese wissenschaftlicher Erklärungen und Kontroversen um den anthropogenen Abbau stratosphärischen Ozons (z.B. Böschen 2000, Roan 1990, Stolarski 1999, 2001; auch Grundmann 1999, 2001, Parson 2003). In dieser Arbeit geht es demgegenüber vorrangig um die Untersuchung und Einordnung wissenschaftlich anerkannter Ergebnisse und sie erklärender Theorien der Ozonforschung in einem auf kognitiver Ebene angesiedelten Analyseraster: welche Erklärungsmuster, welche theoretische Reichweite, welche disziplinären und interdisziplinären Merkmale weist die Ozonforschung auf? Darüber hinaus werden auch die sozialen Bedingungszusammenhänge und Strukturmerkmale resümiert, die diese Entwicklung der Ozonforschung erst ermöglicht haben.

Hierbei sei festgehalten, dass diese Studie damit im Kern in den jeweiligen (scientific) communities (inzwischen) durchaus bekannte bzw. entsprechend konstruierte Tatbestände zusammenfasst und epistemologisch bzw. wissenschaftssoziologisch rekonstruiert, und sie von daher keine genuin neuen empirischen Erkenntnisse präsentiert.

2 Methodische Vorgehensweise und Grenzen

Da (1) die (disziplinäre) Struktur wissenschaftlicher Erklärungen in der atmosphärischen, insbesondere stratosphärischen Ozonforschung den wesentlichen Referenzpunkt dieser Studie bildet, (2) die grundsätzliche Entwicklung der Ozonforschung weitgehend bekannt ist und (3) deren detaillierte wissenschaftshistorische Rekonstruktion den Rahmen dieser Studie sprengen würde, geben die Kapitel 3 und 4 jeweils einen holzschnittartigen Überblick über Entwicklung und Ergebnisse der Ozonforschung sowie über ihre markanten sozialen Strukturmerkmale.[3] Danach stehen Präsentation und Erörterung ihrer signifikanten Ergebnisse und der sie erklärenden Modelle und Theorien im Zentrum der Studie. Gemäß der Leitfrage des Teilprojekts interessieren somit insbesondere Art der disziplinären Bezüge und Verankerung von Forschungsergebnissen und Erklärungsmodellen der Ozonforschung sowie damit zusammenhängende mögliche Konsequenzen für die Veränderung der Struktur dieser problemorientierten Forschung.[4] Diese Priorität einer eher wissenschaftstheoretisch-epistemologischen Untersuchungsperspektive rechtfertigt die Vernachlässigung der genaueren Analyse ihres sozialen Entstehungszusammenhangs.

3 Die Frage, ob die jeweils bestehende soziale Struktur der Ozonforschung deren Ergebnisse nicht nur in ihren thematischen Schwerpunkten und Aussagemöglichkeiten, sondern auch in ihrer Substanz beeinflusst (hat), kann in dieser Studie somit nicht untersucht und geprüft werden. Ihr diesbezüglicher Einfluss wird jedoch à la longue als vermutlich insignifikant und damit relativ irrelevant eingestuft, vor allem weil in der Ozonforschung nach übereinstimmender Meinung Schließungsprozesse bezüglich konkurrierender Erklärungen/Theorien weitgehend stattgefunden haben und ein solcher Einfluss somit allenfalls zeitweise für diese Schließungsphase vermutet werden kann.

4 “Problem oriented research, as opposed to basic research, is less interested in gaining new general scientific findings, but more concerned with the utilization of general knowledge for practical (social) problems which are not structured according to disciplinary categories and delimitations. This implies inherent uncertainties and the necessity of (problem oriented) interlinkage of disciplinary knowledge… The central problem of problem oriented science is to find the right balance between sufficient theoretical orientation and sufficient problem concern. On the one hand, problem oriented research often lacks an appropriate theoretical framework, maturity, effectiveness, persistency, consensus concerning concepts and methods. On the other hand, theoretical orientation, which (in principle at least) is also technically superior in the longer run, may again reduce problem orientation to questions of a newly developed disciplinary matrix.” (Conrad 2002:57)

Im Wesentlichen beruhen die (empirischen) Ergebnisse dieser Studie auf vier Quellen:

– Auswertung (sozial)wissenschaftlicher Literatur über Ozonforschung und -politik (insbesondere Andersen/Sarma 2002, Benedick 1991, Böschen 2000, Clark/The Social Learning Group 2001, Crutzen 1996, Feister 1990, Grundmann 1999, Johnston 1992, Lambright 2005, Parson 2003, Roan 1990, Schmidt 1988, Solomon 1999, Stolarski 1999)5
– Interviews mit sieben in der deutschen Ozonforschung aktiven, maßgeblichen Wissenschaftlern: Arnold, Burrows, Crutzen, Langematz, Schmidt, Schrems, Zellner
– Auswertung zentraler Berichte über Stand und Ergebnisse der Ozonforschung, dabei vorrangig deren executive summaries: BMBF 1990, 2000, EU-Commission 2001, WMO 1986, 1995, 1998, 2003
– Durchsicht von die Atmosphären- und Klimaforschung betreffenden Lehrbüchern, vorrangig Brasseur et al. 1999.6

Ergänzend kommen die Nutzung von Untersuchungen der Klimaforschung und -politik, von Arbeiten aus der (u.a. Disziplinarität und Interdisziplinarität erörternden) Wissenschafts-forschung und die Berücksichtigung kritischer Kommentare einiger Interviewpartner zum Berichtsentwurf hinzu.[7]

Die zwischen Ende Januar und Ende Februar 2005 durchgeführten, zwischen 40 und 100 Minuten währenden, überwiegend telefonischen Interviews waren entlang von Fragen organisiert, die sowohl die kognitive Ebene wissenschaftlichen Wissens (z.B. nach neueren konkurrierenden Erklärungen, nach divergierenden Messverfahren und -ergebnissen, nach der Struktur von Modellen, nach der Reife und Erschöpfung der stratosphärischen Ozonforschung) als auch die Ebene wissenschaftlicher Akteure (z.B. nach dem Verhältnis von Kooperation und Konkurrenz, nach der Intensität von wissenschaftlicher Kommunikation und Austausch zwischen verschiedenen Bereichen, nach der Rolle der Ozonforschungsprogramme) betrafen. Dabei sollten und konnten die Interviewpartner ihre Sicht und Schwerpunkte bei der Darstellung von Entwicklung und Ergebnissen der Ozonforschung vor allem der letzten 20 Jahre[8] frei einbringen, wozu dann (fallspezifisch) ergänzende Fragen gestellt wurden. Während in den ersten Interviews häufig auch Fragen und Antworten zu grundlegenden Ergebnissen und Erklärungsmodellen der stratosphärischen Ozonforschung im Vordergrund standen, ging es in den letzten vor allem auch um die (Validierung erlaubende) erneute, unabhängige und ergänzende Darstellung dieser Entwicklungsdynamik und Erkenntnisse der Ozonforschung und um die Einschätzung ihrer von meiner Seite vorgetragenen Struktur- und Prozessmerkmale.

5 Nicht näher berücksichtigt wurden etwa: Andersen et al. 1997, Brack 1996, Cagin/Dray 1993, Canan/Reichman 2002, Christie 2000, Cook 1996, Dotto/Schiff 1978, Gehring 1994, Gribbin 1988, Lemmerich 1990, Liftin 1994, Miller/Mintzer 1986, Nantze 1991, Tolba/Rummel-Bulska 1998. – Vor der Veröffentlichung wurden ergänzend wenige wesentliche, in IPCC/TEAP 2005 und WMO 2007 referierte Forschungsergebnisse eingefügt.

6 Ergänzend wurden Malberg 1994, Roedel 2000 und Wayne 2000 zu Rate gezogen.

7 Es sei erwähnt, dass ohne die spontane Hilfsbereitschaft mehrerer Interviewpartner sowie der Bibliothek des Instituts für Meteorologie der FU Berlin diese Studie nicht in einem Zeitraum von zwei Monaten hätte durchgeführt werden können. Hierfür sei den Beteiligten ausdrücklich gedankt.

8 Da mir frühere Phasen aus der Literatur bereits relativ bekannt waren, wurde die Zeit vor 1985 kaum weiter berührt.

Im Ergebnis waren die Interviews für den Prozess meiner zunehmenden Durchdringung und Strukturierung der Ozonforschung wichtig und hilfreich.[9] Für die in dieser Studie dargestellten Ergebnisse und Erklärungen der Ozonforschung samt ihrer disziplinären Verankerung erwies sich aber letztendlich die Analyse der Reports und Lehrbücher sowie weniger ausgewählter Literatur (im Wesentlichen Böschen 2000, Clark/The Social Learning Group 2001, Grundmann 1999, Parson 2003, Roan 1990) als zentral, da sich ebendiese dort zentral niederschlagen und somit per se ausführlicher und umfangreicher dargestellt werden. Während
Assessment Reports dabei vorrangig wissenschaftlich allgemein anerkannte Forschungsergebnisse und Tatbestände und den Grad der Gewissheit dieses Wissens als auch wissenschaftliches Nichtwissen resümieren, präsentieren Lehrbücher neben ihrer Darstellung primär die diese Tatbestände beschreibenden Modelle und erklärenden Theorien.[10]

Jüngste Entwicklungen der Ozonforschung nach 2000 konnten aufgrund der verfügbaren Literatur kaum berücksichtigt werden.[11]

Da es sich hierbei (laut Aussagen einiger Interviewpartner) jedoch nunmehr im Wesentlichen um normal science (vgl. Kuhn 1973) mit weiteren ergänzenden, die bestehenden Erklärungsmodelle und Theorien primär komplettierenden und nicht mit signifikant neuartigen Befunden konfrontierenden Forschungsergebnissen handelt, ist dies voraussichtlich ohne großen Belang für die Schlussfolgerungen dieser Studie.[12]

Grundsätzlich handelt es sich bei dieser, im Wesentlichen von Januar bis März 2005 erstellten Studie um eine *Sekundäranalyse*, insofern ihre Aussagen zentral auf Angaben der Interviewpartner, auf der Auswertung von auf (peer) review beruhenden, nicht nur an die scientific community adressierten Berichten und von Lehrbüchern, und nicht auf der Analyse von wissenschaftlicher Primärliteratur in Fachzeitschriften und preprints beruhen. Darüber hinaus verfügt der Verfasser nicht über die genuine fachwissenschaftliche Kompetenz, um die Richtigkeit der (referierten) Ergebnisse der Ozonforschung zumindest potenziell selbst kritisch überprüfen zu können. Von daher kam der informellen Evaluation des Berichtsentwurfs seitens einiger Interviewpartner eine wichtige Rolle zu.

Die arbeitsökonomisch begründete Begrenzung der Interviews auf in Deutschland tätige Wissenschaftler dürfte die Validität der Studie nicht beeinträchtigen, weil es sich (1) hierbei um (von einem eminenten Klimawissenschaftler) empfohlene Schlüsselpersonen der Ozonforschung handelt, weil

9 Darüber hinaus stellten mir mehrere Interviewpartner rasch ausgewählte (teils nicht leicht verfügbare) Literatur zur Verfügung und gaben mir bedeutsame Literatur- und Internethinweise.

10 So listet z.B. das Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2002 (WMO 2003) über mehrere Hundert Seiten vor allem Volumina, zeitliche Entwicklung und Lebensdauer von Spurengasen in der Atmosphäre, den Umfang ihrer industriellen Produktion, polare und globale Ozongehalte und -verluste und diese erklärende Mechanismen, Veränderungen und Wirkungen von bodennaher UV-Strahlung sowie die Unsicherheiten der jeweiligen Mess-ergebnisse auf. Demgegenüber behandelt z.B. Wayne (2000) in seinem Lehrbuch „Chemistry of Atmospheres“ auf 160 Seiten Ozon in der Stratosphäre systematisch in Bezug auf chemische Reaktionen, den Einfluss von Spurengasen, Störungen der Stratosphäre, die Auswirkungen menschlicher Einträge und polare Ozonlöcher. Lediglich die zusammenfassende ausführlichere Darstellung der wissenschaftlichen Arbeiten über den stratosphärischen Ozonabbau von Solomon (1999) greift (naturgemäß) beide Perspektiven auf.

11 Diesbezügliche Aussagen beruhen im Wesentlichen auf Aussagen der Interviewpartner und – bei der Überarbeitung des im März 2005 fertiggestellten Manuskripts – auf den Kommentaren von vier Interviewpartnern und zwei weiteren interessierten Ozonforschern.

12 Dies gilt so nicht für die Wirkungszusammenhänge von UV-Strahlung untersuchende UV-Forschung, wo die Anzahl der wissenschaftlichen Veröffentlichungen seit 1998 stark angestiegen ist, die jedoch als sozial und kognitiv eigenständiges Forschungsgebiet, wie im nächsten Kapitel begründet, nicht weiter betrachtet wird.

(2) (wissenschaftliche) Kontroversen in ihr derzeit keine Rolle mehr spielen und weil (3) die maßgeblich herangezogenen WMO-Berichte den internationalen Stand der Forschung wiedergeben, wobei in ihnen US-amerikanische Wissenschaftler mit ca. 50% - 70% Anteil an Autorschaft und Review Panels aufgrund des im internationalen
Vergleich tatsächlichen großen Gewichts der US-Ozonforschung durchaus begründet dominieren.[13]

Da die interviewten Wissenschaftler sowohl den maßgeblichen disziplinären Hintergründen entstammen (Physik, physikalische Chemie, Meteorologie) als auch die verschiedenen in der Ozonforschung relevanten Arbeitsbereiche abdecken (theoretische Atmosphärenchemie,
Messung von Spurengasen und Atmosphärendynamik, Durchführung von Messkampagnen (vor allem in der nördlichen Hemisphäre), Durchführung und Auswertung von Satellitenmessungen, bodengestützte Messreihen und Messdatenanalyse, Laborexperimente, Entwicklung und Evaluation von Klimamodellen), decken sie das gesamte Gebiet der Ozonforschung zumindest grob ab, so dass mit der vorgenommenen Selektion der Interviewpartner keine systematische Verzerrung der über sie erhobenen Informationen angenommen werden muss. Darüber hinaus fanden sich in den Interviews auch keine widersprüchlichen Tatsachenbehauptungen, wohl aber teils differierende Gewichtungen und Einschätzungen, z.B. hinsichtlich des Stellenwerts der troposphärischen Ozonforschung ab 2000 oder hinsichtlich möglicher Disziplinbildungsprozesse in der Klimaforschung.

Der aus der selektiv ausgewählten (Fach-)Literatur resultierende Bias dürfte für die in dieser Studie vorgetragenen Aussagen keine signifikante Rolle spielen, weil die nicht berücksichtigten Reports und Lehrbücher (auch laut Aussage einiger Interviewpartner) diesbezüglich ähnlich aufgebaut sind und analoge Forschungsergebnisse präsentieren, da sie im Allgemeinen die überwiegend gleichen Themen und Fragestellungen in diese Forschungsergebnisse nur mehr zusammenfassender Weise behandeln.

Die Validität der Studie beruht somit auf der kritischen Übernahme von Angaben aus Literatur und Interviewpartnern. Sie kann von daher somit zwar Konsistenz und Plausibilität, jedoch keine hiervon unabhängige Gültigkeit ihrer Ergebnisse für sich beanspruchen. Insofern die aus ihnen resultierenden wissenschaftstheoretischen und -soziologischen Schlussfolgerungen primär genereller und weniger spezifische Details unterscheidender Natur sind, kann jedoch mit hoher Wahrscheinlichkeit von deren Tragfähigkeit ausgegangen werden.

Der Aufbau der Studie ist systematisch auf die zentrale Forschungsfrage nach den disziplinären Verankerungen der Ozonforschung hin organisiert.[14] Nach einem historischen Überblick über die Entwicklung der Ozonforschung in Kapitel 3, der entsprechende, bereits komprimierte Darstellungen in der Literatur[15] zusammenfasst, werden in Kapitel 4 die wesentliche soziale Struktur und Determinanten der Ozonforschung wie Forschungsaktivitäten,
-programme, -institutionen und -ressourcen umrissen. In Kapitel 5 werden exemplarisch Hauptergebnisse der atmosphärischen Ozonforschung in mehr als nur kursorischer Weise präsentiert, gegliedert nach den Aspekten: stratosphärisches Ozon allgemein, Antarktis, Arktis, mittlere Breiten,

13 Im UV-Bereich ist die europäische Forschung hingegen gegenüber der US-amerikanischen noch führend.

14 Demgegenüber behandelt Schützenmeister (2006) die historische Entwicklung der atmosphärischen Chemie als eigenständige Subdisziplin (der Klimaforschung) in ihrer maßgeblichen Prägung durch Problemstellungen, wissenschaftliches Wissen und Formen der Forschungsorganisation, wie sie sich in der Ozonforschung herausbildeten.

15 vgl. Andersen/Sarma 2020, Böschen 2000, Clark/The Social Learning Group 2001, Crutzen 1988, 1996, Johnston 1992, Lambright 2005, Parson 2003, Rubin 2001, 2002, 2003, Schmidt 1988, Stolarski 1999, 2001

chemische Stoffe und Laboruntersuchungen, UV-Strahlung, Modelle, theoretische Erklärungen und Erklärungsnotwendigkeiten, Evaluation und Validierung.[16] Die dabei zum Tragen kommenden Theorien und Modelle und deren disziplinärer Hintergrund werden in Kapitel 6 kompakt dargestellt, wodurch sich zugleich zumindest grob der konzeptionelle (und theoretische) Zusammenhang der zuvor aufgelisteten Ergebnisse der Ozonforschung erschließt. Während dabei ihr teils kontroverser Entstehungszusammenhang keine Rolle spielt, geht es in Kapitel 7 gerade um die Ergebnisse und Gründe der Schließung solcher Kontroversen, wobei weniger die ihr zugrunde liegenden sozialen Prozesse und Mechanismen als vielmehr die hierfür verantwortlichen empirischen und theoretischen Befunde und deren wissenschaftliche Stringenz im Vordergrund stehen. Kapitel 8 verdeutlicht dann die immer schon bestehende, aufgrund ihrer neueren Erkenntnisse jedoch noch zunehmende Einbettung der Ozonforschung in die Atmosphärenforschung, wobei gerade die Frage nach ihrer disziplinären Verankerung die Atmosphärenforschung und nicht die Klimaforschung als theorierelevanten Einbettungskontext nahe legt. Kapitel 9 präsentiert das Resümee der Analyse und zieht einige wissenschaftssoziologische Schlussfolgerungen im Hinblick auf die Wirksamkeit und Eindeutigkeit disziplinärer Verankerungen der problemorientierten Ozonforschung.

3 Historischer Überblick

Der nachfolgende historische Überblick benennt sechs aufeinander folgende Phasen der Ozonforschung, die sich vorrangig aus unterschiedlichen Niveaus eines zunehmenden wissenschaftlichen Verständnisses und Erklärung von vor allem *atmosphärischem* Ozon ableiten. 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.[17] Dass sich insbesondere im Zuge der gesellschaftlich als relevant definierten Frage des stratosphärischen Ozonabbaus begrenzt eine sozial ausdifferenzierte ‚scientific community', d.h. eine specialty[18] der Ozonforschung

16 Dabei werden im Allgemeinen nur wesentliche Forschungsergebnisse und Quintessenzen und nicht deren wissenschaftliche Herleitung und Begründung, z.B. in Form von Reaktionsgleichungen, vorgestellt, die sich in den Lehrbüchern mehr oder weniger ausführlich wiederfinden.

17 Abgesehen von stets möglichen Spezialisierungen der Forschung auf ein Element oder Atom in abgegrenzten specialties pflegen sich bestimmte Teilgebiete der Chemie nicht auf ein bestimmtes chemisches Element zu beziehen. So rührt auch der Kohlenstoffbezug der organischen Chemie aus den komplexeren, Kohlenstoffatome enthaltenden chemischen Verbindungen in organischen Materialien und nicht aus jedweden C betreffenden Prozessen her. Erst bestimmte Anwendungsbereiche können dann spezifische chemische Elemente zum Fokus eines Forschungsfeldes werden lassen.

18 Specialties 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. Die tatsächliche Größe derartiger Spezialistengruppen liegt bei 50 bis 200 Wissenschaftlern, „je nachdem wie eng man das Konzept des Spezialwissens und den Sachverhalt des tatsächlich kompetenten Verstehens (im Sinne der Fähigkeit zur Nachprüfung) auslegt." (Weingart 1987:161, Weingart 2001, Chubin 1976) Dabei sind etwa die an einem Großexperiment beteiligten Wissenschaftler keineswegs durchgängig und vorrangig im jeweiligen Theorie prüfenden und gestaltenden Diskurs involviert. Vielmehr lösen sie, bei grober Kenntnis dieses Diskurses, häufig ihre je eigenen, auf das Gesamtexperiment bezogenen Aufgaben, z.B. die Entwicklung entsprechender Messinstrumente.

bildete, rechtfertigt den Begriff der Ozonforschung zwar auch auf sozialer Ebene, ist jedoch im Rahmen dieser Studie keine notwendige Bedingung.

Die Relevanz dieser auf den wissenschaftlichen Erklärungskontext abzielenden Abgrenzung wird sofort deutlich, wenn die zu Ozonproblem[19] und Ozonregime zählenden Forschungsfelder angeführt werden, die nicht der Ozonforschung zuzurechnen sind und daher hier nicht weiter betrachtet werden. (1) So ist 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 notwendig, um ihre (zukünftige) Menge und Konzentration in der Stratosphäre abschätzen zu können, wo insbesondere das zum katalytischen Ozonabbau[20] 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.[21] (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 Montrealprotokolls 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 Ozonzerstörungspotenzial (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) 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.[22]

Die Darstellung der die einzelnen Phasen der Ozonforschung bestimmenden Erkenntnisinteressen und Erklärungsebenen benennt dabei durchaus auch die sie prägenden sozialen Akteure, Institutionen und Bedingungen. Sie fokussiert dabei auf atmosphärische Ozonforschung, während etwa

19 Die das Ozonproblem beschreibende, inzwischen wissenschaftlich abgesicherte Risikohypothese setzt sich im Wesentlichen aus folgenden Komponenten zusammen: „(1) Die Senke kann kein erdnaher 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.“ (Böschen 2000:45)

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

21 Die Entdeckung der FCKWs als Kühlmittel durch Midgley 1928 und ihre anschließende massive und vielfältige 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.

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

industrielle Nutzungen von Ozon[23] gleichfalls mit Ozonforschung verbunden sind, die jedoch (heute) typischerweise nicht ein vergleichbares Ausmaß und Komplexität aufweist.[24]

Die nachfolgende Kompaktheit des historischen Überblicks erscheint deshalb gerechtfertigt, weil die Entwicklung der Ozonforschung bereits in der zitierten Literatur teils ausführlicher dargestellt wird[25] und im Rahmen dieser Studie primär ihre (heutigen) disziplinären Verankerungen interessieren. Dabei lassen die teils in Anlehnung an Stolarski (1999, 2001) unterschiedenen, nachfolgend beschriebenen Phasen der Ozonforschung gerade die verschiedenen Stufen in ihren Erklärungsniveaus und Messmöglichkeiten prägnanter hervortreten:

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

3.1 Entdeckung des Ozons und Bestimmung seiner Eigenschaften (~1840 - ~1880)

Diese erste Phase war gekennzeichnet von der Entdeckung des Ozons durch Schönbein 1839, der Entwicklung quantitativer chemischer Messverfahren zur Bestimmung seiner Konzentration in der Luft und der Behauptung seiner Zusammensetzung aus drei Sauerstoffatomen (O_3) durch Hunt 1848 bzw. Soret 1864. An mehreren hundert Messstationen wurden routinemäßig Ozonkonzentrationen der Umgebungsluft gemessen[26] und Mitte der 1870er Jahre war Ozon als ein wichtiger Bestandteil der Luft anerkannt und untersucht (vgl. Leeds 1880).[27]

---

23 Diese betraf aufgrund seiner Keime abtötenden Wirkung insbesondere nach 1900 vorzugsweise die Reinigung von Trink- und Abwasser und die Desinfektion von Lebensmitteln oder chirurgischen Instrumenten (vgl. Feister 1990:43ff). „By the early twentieth century ozone generators and ozonolysis were common in many chemical laboratories.“ (Farrell 2005:62)

24 So war Ozon bereits in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts ein sehr wichtiger und lebendiger Forschungsgegenstand. „To the Philosopher, the Physician, the Meteorologist, and the Chemist, there is perhaps no subject more attractive than that of ozone.” (Fox 1873, zitiert aus Stolarski 1999:2)

25 Einen ausführlichen tabellarischen chronologischen Überblick von 33 Seiten geben Andersen/Sarma (2002), in dem für jedes Jahr(zehnt) bis 2002 politische Ereignisse auf internationaler und nationaler Ebene, relevante wissenschaftliche und technologische Erkenntnisse und Entwicklungen sowie Aktionen von Nichtregierungsorganisationen (NGOs) aufgelistet werden.

26 Allerdings bleibt festzuhalten, dass „most of these efforts were short-lived and produced only semi-quantitative results due to chemical interference, a lack of standardization, and a dependence on wind speed. Observers at the time described the practices as ‘chaotic’ and ‘eminently unsatisfactory’.” (Farrell 2005:61)

27 Schmidt (1988:13) verweist auf den Hinweis von Nicolet, „dass die französische Nationale Akademie der Wissenschaften in Paris bereits im Jahre 1865 eine Kommission von 9 Mitgliedern bestimmte, um die Zahl der theoretischen

3.2 Lokalisierung von Ozon in der Stratosphäre und seine Absorption der UV-Strahlung (~1880 - ~ 1930)

Die zweite Phase führte insbesondere zur Lokalisierung und genaueren quantitativen Bestimmung des Großteils atmosphärischen Ozons in der Stratosphäre und zur Bestimmung seiner zentralen Rolle bei der Absorption der UV-Strahlung zwischen 200 und 300 nm (Hartley-Bande) und zwischen 320 und 360 nm (Huggins-Bande). Hierbei spielten bereits drei unterschiedliche Forschungszweige eine Rolle, die im Prinzip bis heute den Kern des Verständnisses atmosphärischer Ozonprozesse ausmachen: chemische Eigenschaften und Reaktionen der Bestandteile der Atmosphäre (Chemie), Lichteigenschaften und seine Wechselwirkung mit Materie in der Atmosphäre (Photophysik und Photochemie), und physikalische Komposition und Dynamik der Atmosphäre (Strömungsphysik, Energiebilanzen, Mikrophysik[28]).

Im Einzelnen beobachtete Cornu 1879 den plötzlichen Abbruch des Sonnenspektrums unterhalb von 300 nm, entdeckte Hartley daraufhin 1880/81 die entsprechende Absorptionsbande im Ozon und postulierte höhere Ozonkonzentrationen in der Stratosphäre als an der Erdoberfläche, und bestimmte Ladenburg 1899 das Molekulargewicht von Ozon M=48 und bestätigte damit seine vermutete chemische Struktur.[29] Seit der Jahrhundertwende wurden sowohl spektroskopische Messverfahren des Ozons entwickelt (Fabry/Buisson 1913, Dobson 1924/28, Götz 1929 (Umkehrmethode)) als auch hochfliegende Ballone für stratosphärische Messungen gestartet.[30] Es entstand ein Grundverständnis vom Aufbau der Atmosphäre mit einer Temperaturinversion[31] in der deshalb ruhigeren Stratosphäre und von der vertikalen Verteilung des Ozons (vgl. Abb. 3.1). Mit der durch Dobson 1926/27 initiierten Einrichtung eines koordinierten Netzwerks von Ozonmessstationen (Dobson et al. 1927) wurden tages- und jahreszeitliche Schwankungen sowie wetterbezogene und breitenabhängige Variationen des auf insgesamt 3 mm bestimmten reinen Ozons[32] unter Normalbedingungen (Fabry/Buisson, Götz) festgestellt.[33] 1929 fand dann die erste internationale Ozon-

und experimentellen Veröffentlichungen über Ozon sowie von solchen, die Beobachtungsergebnisse darüber mitteilten, zu reduzieren, und um von dieser Kommission Empfehlungen und Kommentare vor jeder Veröffentlichung zu erhalten."

28 Die Mikrophysik befasst sich in der Atmosphärenforschung insbesondere mit allen physikalisch-chemischen Vorgängen an Aerosol- und Wolkenteilchen, wie Nukleation, Diffusion in Gasphase und kondensierter Phase, Wachstum und Verdampfung, Gefrieren und Schmelzen der Teilchen.

29 Der empirische Nachweis der Ozonspaltung durch UV-Strahlung gelang erst Regener 1906.

30 Demgegenüber verloren die auf dem hohen Oxidationspotenzial von Ozon basierenden chemischen Messverfahren troposphärischen Ozons um die Jahrhundertwende an Interesse und Bedeutung. „The most important reason for this decline is probably the failure to find a relationship between ozone and disease. The contemporaneous acceptance of the germ theory of disease and recognition of the key role of sanitation in public health may have been a factor." (Farrell 2005:62) Dabei hatte eine Gruppe französischer Ozonforscher in Montsouris 1876-1910 eine Langzeit-Messserie und die erste Vergleichsstudie von diesbezüglichen Ozonmesstechniken durchgeführt (vgl. Bojkov 1986).

31 Dieser Wiederanstieg der Temperatur oberhalb der Tropopause resultiert im Wesentlichen aus dem sich einstellenden Strahlungsgleichgewicht infolge der Absorption energiereicher kurzwelliger UV-Strahlung durch das stratosphärische Ozon mit bis zu einigen ppmv, entsprechend mehr als 50 nb zwischen 15 und 40 km Höhe. (Der Ozongehalt wird entweder als (absoluter) Partialdruck in hPa (1 bar = 10^5 Pascal), als Mischungsverhältnis (O_3-Partialdruck/Gesamtluftdruck in der jeweiligen Höhe) in ppm oder als Konzentration in Molekülzahl pro cm^3 angegeben.)

32 Nach Dobson wird die Ozonsäule auch in DU (Dobson-Einheiten) gemessen: 100 DU = 1 mm Ozon. (Die Ozonmenge kann auch als Säulendichte in mm angegeben werden, die sich ergäbe, wenn alle Ozonmoleküle in einer Luftsäule über dem Boden auf den Bodendruck zusammengepresst würden.)

33 Aus diesen Bemühungen resultiert auch die längste kontinuierliche, 1926 begonnene Messserie atmosphärischen Ozons in Arosa/Schweiz (Staehelin et al. 1998a, Staehelin/Weiss 2001).

konferenz in Paris statt, den von Beginn an internationalen Charakter und die wissenschaftliche Relevanz der Ozonforschung widerspiegelnd.

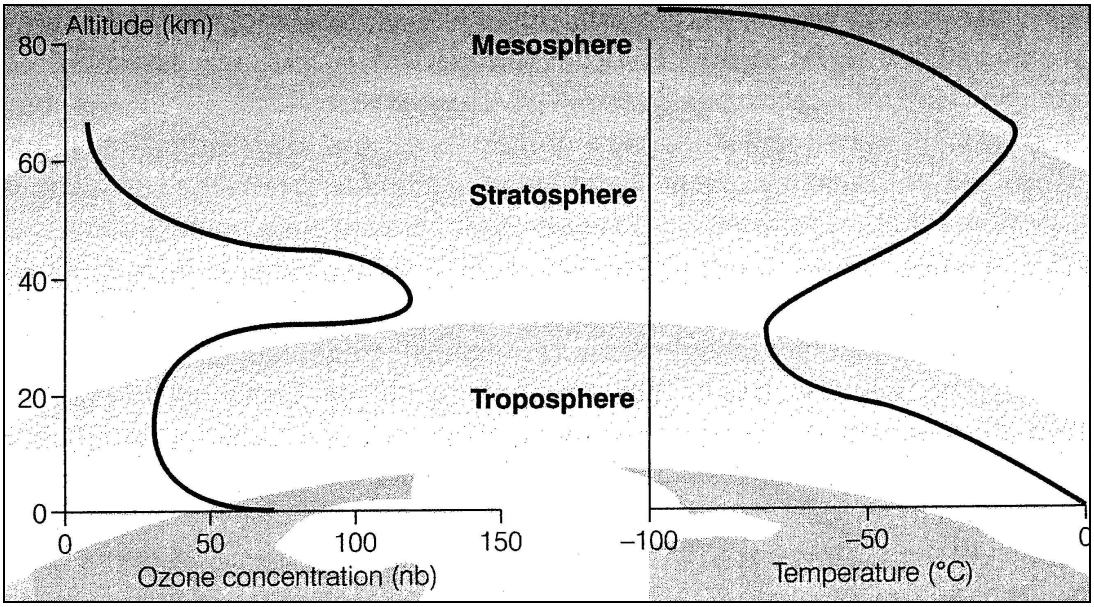

Abb. 3.1: Vertikale Ozonkonzentration und Temperaturwerte in der Atmosphäre
Quelle: Andersen/Sarma 2002:3

Ergänzend seien für diese Phase noch erwähnt die Erfindung von Chlorkohlenwasserstoffen durch Midgley 1928 (Midgley/Henne 1930), die Beobachtung, dass Chlor (Weigert 1907) und Brom (Griffith/McKeown 1925) photochemischen Ozonabbau stark beschleunigen, und die Entdeckung, dass UV-Strahlung Hautkrebs erzeugen kann (Findlay 1928).[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]

34 Erstmals behandelte Unna den Zusammenhang von Sonnenlicht und Hautkrebs 1896 in einem Lehrbuch über Hauterkrankungen unter dem Phänomen „Seemannshaut“.

35 Zwischen Ozon in der Stratosphäre und ins Auge gefassten möglichen (toxischen) Wirkungen der neu entwickelten, chemisch inerten FCKWs gab es 1930 keine kognitive Verknüpfung, da zum einen ein Erwartungshorizont „Globale Umwelt“ mit dem Augenmerk auf mögliche Fernfolgen im Bereich der Umweltrisiken noch nicht bestand und zum anderen noch keine entsprechenden Messverfahren existierten, um eine entsprechende Hypothese chlorinduzierten katalytischen Ozonabbaus experimentell zu überprüfen.

3.3 Theorie und Quantifizierung der atmosphärischen Ozonverteilung (~1930 - ~1965)

Die dritte Phase war insbesondere durch die (stringente) theoretische Erklärung und die genauere quantitative Messung von Ozonphänomenen in der Stratosphäre geprägt. Chapman (1930a) formulierte die photochemische Basis für die theoretische Behandlung des stratosphärischen Ozons, die theoretische Atmosphärenphysiker nachfolgend durch Einbeziehung atmosphärischer Dynamik weiter ausbauten, was zu den heutigen computerbasierten Modellrechnungen der stratosphärischen Dynamik und Photochemie führte. Diese Basis besteht aus den 4 bekannten chemisch-photochemischen Reaktionsgleichungen, die die Erzeugung und Zerstörung des Ozonmoleküls unter Einwirkung ultravioletten (<242 nm) bzw. sichtbaren (<1180 nm) Sonnenlichts beschreiben (vgl. Abb. 3.2). Messungen von Götz, Meetham und Dobson (1934) mithilfe der Umkehrmethode bestätigten im Grundsatz Chapmans Theorie experimentell durch die beobachtete vertikale Ozonverteilung in der Atmosphäre.

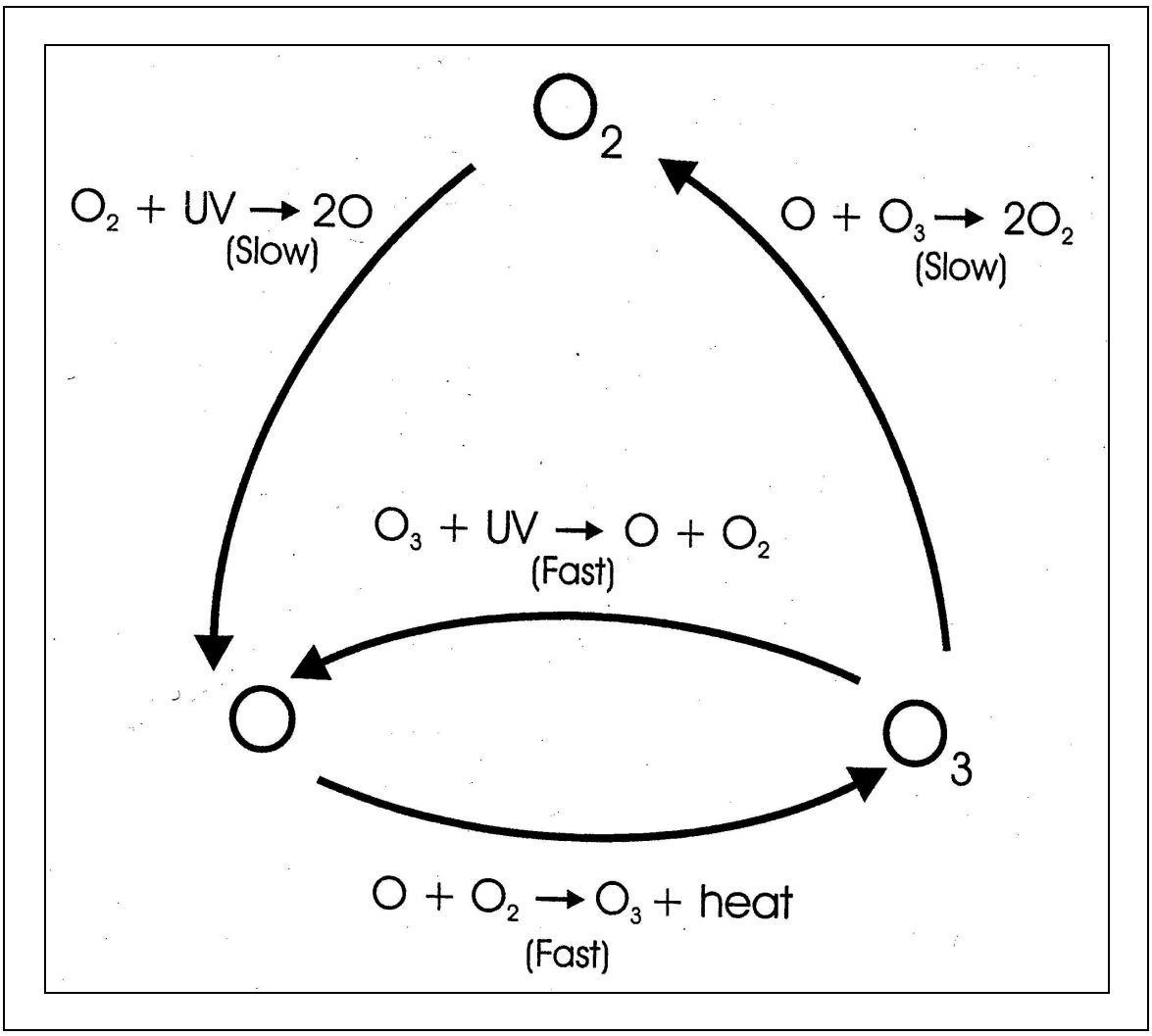

Abb. 3.2: Bildung und Zerstörung von Ozon aus Sauerstoff
Quelle: Parson 2003:17

Während Chapmans Theorie fälschlicherweise eine vom Äquator zu den Polen hin abnehmende statt zunehmende Ozonsäulendichte vorhersagte, führte sie in Verbindung mit einer dynamischen Theorie (vgl. Dobson/With 1930, Dobson 1956, Dobson et al. 1946, Brewer 1949, Newell 1963) zu im Wesentlichen korrekter Wiedergabe der jahreszeitlichen und breitenbezogenen Verteilung des Ozons. Diese Theorie postulierte eine atmosphärische Zirkulation mit langsamem Lufttransport nach oben in die Stratosphäre in den Tropen, nach unten und polwärts in mittleren Breiten und zurück in die Troposphäre in mittleren und hohen Breiten.[36] Die anschließende vor allem meteorologische Ozonforschung basierte bis in die 1960 Jahre weitgehend auf dieser Kombination von Chapmans chemischer Theorie des Ozongleichgewichts und der dynamischen Theorie stratosphärischer Zirkulation von Brewer und Dobson.

Aufgrund vor allem seit den 1950er Jahren wesentlich verbesserter atmosphärischer und chemischer Messverfahren, die die Messung der Emission spezifischer Spektrallinien mit hochauflösenden Spektrometern, die Beobachtung vieler Spurengase wie Stickstoffoxid (NO) und Hydroxid (OH), und die Untersuchung der Reaktionskinetik hochreaktiver kurzlebiger Radikale in sehr geringen Konzentrationen im Labor ermöglichten, wurde erkannt, dass Chapmans Theorie die bis zu dreifache Menge der tatsächlich gemessenen Ozonkonzentration vorhersagte. Deshalb musste es weitere Ozonsenken oder ozonabbauende Spurengase geben, die für das niedrigere Ozongleichgewicht in der Stratosphäre verantwortlich waren.[37] Bates und Nicolet veröffentlichten diesbezüglich bereits 1950 (Bates/Nicolet 1950a, 1950b) eine photochemische Theorie katalytischen Ozonabbaus durch Wasserstoffradikale (HO_x)[38], präzisiert durch McGrath und Norrish 1958.

Entscheidend für das genauere Wissen über die Atmosphäre und das atmosphärische Ozon war das Zusammenspiel von drei hierfür notwendigen (technischen) Voraussetzungen:

– Entwicklung besserer Messinstrumente sowohl in geräte- und transporttechnischer (z.B. stratosphärische Ballone39 bis hin zu ersten Satellitenmessungen 1966) als auch in analytisch-messtechnischer (z.B. präzisere Auflösung von Spektrallinien) Hinsicht (vgl. die Beschreibungen von Schmidt 1988),
– zunehmende Einsatzmöglichkeiten von Computern und ständig wachsende Rechnerkapazitäten (z.B. erste Klimamodelle, Wettervorhersage, schnellere Auswertung von Umkehrdaten der Dobson-Spektrometermessungen),
– Etablierung und Kalibrierung eines nunmehr weltweiten Ozon-Messnetzwerks (Global Ozone Observing System), das 1955 von der Internationalen Ozonkommission (IOC)40 und der World Meteorological Organization (WMO) vorgeschlagen und im Rahmen des Internationalen Geo-

36 Ähnliche Überlegungen über große Ozontransporte in der Stratosphäre kamen von Dütsch (1946), Schröer (1949) und Craig (1950) (vgl. Schmidt 1988:41).

37 Denn die Hauptbestandteile der Atmosphäre, Stickstoff (N_2) und Sauerstoff (O_2) reagieren nicht mit Ozon.

38 Nicolet (1955) befasste sich auch mit der Chemie von Stickoxiden in der oberen Atmosphäre.

39 Die ersten direkten In-situ-Messungen der Ozonkonzentration in verschiedenen Höhen der Stratosphäre (bis 31 km) gelangen Regener und Mitarbeiter 1934 mit ballongetragenen Spektrographen (Crutzen 1988, Regener 1951, Schmidt 1988).

40 Die IOC wurde 1948 von der Internationalen Union für Geodäsie und Geophysik (IUGG) als eigenständige Institution aus der Internationalen Strahlungskommission (IRS) ausgegründet und gehört der Internationalen Assoziation für Meteorologie und Atmosphärenphysik (IAMAP) an.

physikalischen Jahres41 (1957-58/59) mit 140 Ozon-Messstationen installiert wurde42, deren Messinstrumente und -verfahren in den nachfolgenden Jahren zugleich systematisch verbessert und geeicht wurden43 (vgl. Dobson 1973, Farrell 2005, NAS 1965).44

Während die stratosphärische Ozonforschung bis in die 1960er Jahre vor allem aus rein wissenschaftlichem Interesse betrieben wurde, traf das für die troposphärische Ozonforschung schon in den 1950er Jahren nur noch bedingt zu, als die mitverantwortliche Rolle des bodennahen Ozons im gesundheitsschädigenden Smog städtischer Ballungsgebiete erkannt wurde.[45] Hier beeinflusste verstärkt auch ein sozial (und nicht primär wissenschaftlich) definiertes (praktisches) Problem Ausmaß und Schwerpunkte der Forschung.[46]

Gegenüber konkurrierenden Erklärungshypothesen des photochemischen Smogs legte ein Schlüsselexperiment von Haagen-Smit et al. (1953) nahe, dass die Photolyse von Kohlenwasserstoffen in Gegenwart von Stickoxiden für die bodennahe Ozonbildung entscheidend ist. Eine hinreichende, die Bildung photochemischen Smogs hinreichend erklärende Theorie war allerdings erst zwei Jahrzehnte später verfügbar, nachdem die Schlüsselrolle des Hydroxyl-Radikals in der Troposphäre entdeckt worden war (vgl. Farrell 2005).

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).

3.4 Katalytischer Ozonabbau (~1965 - ~ 1985)

Diese vierte Phase 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.

---

41 Dieses war das erste große internationale Projekt in den Geowissenschaften und induzierte generell einen großen Aufschwung auch für alle Bereiche der Ozonforschung. So fand in diesem Zusammenhang z.B. die erste großflächige Kampagne direkter (höhenabhängiger) Messungen der Ozonschicht mit Ozonsonden statt, die noch auf den bereits im 19. Jahrhundert entwickelten, inzwischen allerdings verfeinerten und einfacher auswertbaren Kaliumiodid-Instrumenten beruhten (vgl. Ehmert 1949, Farrell 2005, Schmidt 1988).

42 So wurde auch die britische Antarktis-Messstation in Halley Bay aufgebaut, deren langjährige Messserien mitentscheidend für die Entdeckung des Ozonlochs waren.

43 „Die Justierung und Eichung der neuen Geräte und auch die Koordination aller Messungen war Aufgabe des Instituts und Labors von G.M.B. Dobson in Oxford.“ (Schmidt 1988:43)

44 Da messtechnisch gesicherte und vergleichbare Messwerte der gesamten Ozonsäule erst seitdem zur Verfügung stehen, ist darüber hinaus die – für die Analyse historischer Schwankungen in der Stratosphäre relevante – systematische Auswertung und Re-Evaluation von an verschiedenen Orten weltweit durchgeführten früheren Messungen bedeutsam, die sich allerdings – da dies nicht intendierend (Simmons 1990) – nicht für Trendanalysen eignen (vgl. Brönnimann et al. 2003a, 2003b).

45 Anders als der vor allem aus Rauch und Nebel bestehende London-Smog, an dem 1952 an einem Wochenende rund 4000 Menschen starben, bestand der südkalifornische Los Angeles-Smog größtenteils aus Ozon, das auf photochemischem Weg aus Sauerstoff in Reaktion mit Kohlenwasserstoffen und Stickoxiden aus Abgasen durch Verbrennungsprozesse in Autos gebildet wurde.

46 Zur Unterscheidung von wissenschaftlichen, technischen und praktischen Problemen siehe Kapitel 9, FN 174.

In den 1960er und beginnenden 1970er Jahren befasste sich die Ozonforschung mit der Suche nach möglichen Ozonsenken, um die Diskrepanz zwischen Messungen und Chapmans Theorie aufzulösen. Dabei wurden drei Klassen möglicher ozonzerstörender Prozesse identifiziert, die mit Wasserstoff, Stickstoff oder Chlor in Form von HO_x-, NO_x- bzw. Cl-Radikalen verbunden sind (vgl. Wofsy/McElroy 1974, Atkinson et al. 1989). Hampson (1964) entdeckte die Bedeutung des bei der durch UV-Strahlung bewirkten Photodissoziation des Ozons entstehenden angeregten Sauerstoffatoms $O(^1D)$ für die Bildung von HO_x-Radikalen aus Wasserdampf, die ozonzerstörend wirken können. Während Hunt (1965) die mögliche Wirksamkeit eines solchen katalytischen Ozonabbaus in einem mathematischen Modell stratosphärischen Ozons demonstrierte, ergaben Messungen, dass diese Reaktionen zu langsam abliefen, um die geringere stratosphärische Ozonkonzentration erklären zu können.[47] Der von Crutzen (1970, 1971) theoretisch vorgeschlagene katalytische Ozonabbau durch NO_x würde auch deutlich stärker zum Ozonabbau durch Überschallflugzeuge beitragen (Johnston 1971) als Hydroxyl-Radikale (Harrison 1970).[48] Als wichtigster katalytischer Abbauzyklus stellte sich schließlich aber Chlor heraus[49], das durch Photolyse aus aufgrund ihrer Reaktionsträgheit in die Stratosphäre transportierten FCKWs freigesetzt wurde (Molina/Rowland 1974).[50]

Interessanterweise wurden zuvor andere mögliche Chlorquellen diskutiert und als kaum signifikant eingestuft: NASA-Raumfähren (Cicerone et al. 1973, 1974, Stolarski/Cicerone 1974) und Vulkanausbrüche (Wofsy/McElroy 1974). Zugleich wurde auch deutlich, dass solche schnell reagierenden Radikale in Form langlebiger, reaktionsträger Verbindungen gebunden sein müssen, um aus irdischen Quellen in die Stratosphäre zu gelangen. Wiederum konnte (vor dem Hintergrund verbesserter Messplattformen und -verfahren[51]) parallel und in der Folgezeit die Existenz entsprechender Verbindungen in der Stratosphäre nachgewiesen werden, darunter auch von FCKWs (Lovelock 1974, Schmeltekopf et al. 1975, Vedder et al. 1978)[52], während bis 1974 noch keine Messungen vorlagen, die die Existenz von ClO_x in der Stratosphäre belegten (Rowland 1975). Schließlich konnte der Einfluss solarer Teilchenemissionen auf das atmosphärische Ozon anhand einer starken Sonneneruption 1972 quasiexperimentell genauer untersucht werden, insofern dadurch mehr einfallende hochenergetische Protonen und die dadurch vermehrte Bildung von HO_x- und NO_x-

47 Die Arbeiten von Hampson und Hunt fanden übrigens im Rahmen eines Forschungsprojekts statt, das die Wirkungen des Wiedereintritts von Interkontinentalraketen in die Atmosphäre untersuchte.

48 Daneben wurden Kernwaffenexplosionen (nuklearer Winter) und Stickstoffdünger Anfang der 1970er Jahre als mögliche bedeutende NO_x-Quellen erörtert.

49 1972 wies Don Stedman Cicerone und Stolarski in einem Gespräch deutlich darauf hin: „Chlorine destroys ozone. Everybody knows that!“ (zitiert aus Stolarski 1999:6)

50 Das parallel dazu erkannte noch deutlich höhere Ozonzerstörungspotenzial von Brom (Crutzen 1974, Wofsy et al. 1975) geriet erst im nachfolgenden Jahrzehnt verstärkt ins Blickfeld von Wissenschaft, Industrie und Politik.

51 „In den 70er Jahren fanden einige wichtige Entwicklungen statt... Schon vorher waren Bestrebungen in Gang gekommen, das relativ voluminöse und teuere Dobson-Spektrophotometer durch kleinere, leichtere, aber ebenso genau messende Geräte zu ersetzen. Die Lösung dieser Frage lief auf die Entwicklung von Filter-Spektrophotometern hinaus, bei denen statt durch Quarzprismen die benötigten UV-Wellenlängen durch schmalbandige Interferenzfilter aus dem Sonnenlicht ausgefiltert werden. Das von den Filtern hindurchgelassene UV-Licht kann direkt mit Fotomultipliern gemessen werden... 1973 stellte A.W. Brewer sein Gitter-Spektrophotometer vor, bei dem das Sonnenlicht durch ein Beugungsgitter mit 1200 Linien pro mm zerlegt wird und die für die Gesamtozonmessung interessierenden UV-Wellenlängenbereiche durch 5 Schlitze mit hoher Auflösung ausgeblendet werden. Das Gerät arbeitet mit viel Elektronik, und aufwändige optische Teile sind überflüssig geworden. Diese Filter-Ozonometer sollen vor allem zur Verdichtung des Dobson-Messnetzes beitragen.“ (Schmidt 1988:52f)

52 Lovelock hatte bereits 1970 Chlorkohlenwasserstoffe in der Atmosphäre gemessen (Lovelock 1971, Lovelock et al. 1973).

Radikalen (vgl. Crutzen et al. 1975) in polaren Breiten einen Ozonabbau von anfangs 18% bewirkten, und die existierenden photochemischen Theorien des Ozons und entsprechende Modellrechnungen überprüft werden. Ebenso wurden Auswirkungen der etwa 11jährigen Sonnenaktivitätszyklen auf die Ozonverteilung beobachtet (Angell/Korshover 1973, Ruderman/Chamberlain 1973, NAS 1976).

An weiteren relevanten Ergebnissen der Ozonforschung in dieser Phase seien (im Kontext des Ozonproblems) aufgeführt:

- Schädliche Effekte der UV-B Strahlung auf Pflanzen wurden nachgewiesen und quantifiziert (1970).
- Mit den Satelliten Nimbus 4 (1970) und Nimbus 753 (1978) wurde die systematische Ozonbeobachtung von oben (aus dem All) etabliert.54
- Auch in bestimmten Regionen der unteren Troposphäre kann (im photochemischen Smog) in mehreren Kohlenmonoxid (CO) und Stickoxid (NO) einschließenden Reaktionsstufen Ozon durch Sonnenlicht erzeugt werden (Crutzen 1973, Chameides/ Walker 1973).
- FCKWs besitzen in der Stratosphäre überwiegend eine lange Lebensdauer von 50 (CFC-11, HCFC-123) bis 550 (CFC-115) Jahren.
- FCKWs sind außerdem (in der Troposphäre) hochwirksame Treibhausgase (Ramanathan 1975)
- Anderson (1976) berichtete von mit zunehmender Höhe stetig steigenden Chlor- und Chlormonoxid-Konzentrationen, was chemische Reaktionen von Chlor mit Ozon belegt.
- (Aus FCKW freigesetztes) Chlor kann in Reservoirgasen, z.B. Chlornitrat (ClONO2) oder Salzsäure (HCl) gebunden sein, sodass der Ozonabbau entsprechend gebremst wird (1976).
- Angesichts (in den USA) drohender weitergehender Regulierung der Produktion und Nutzung von FCKWs verfolgten deren Hersteller ab 1976 die Entwicklung von Substituten, die sie 1980 – nach deren Patentierung – wieder einstellten und erst nach Verabschiedung des Montreal-Protokolls wieder aufnahmen.
- Vor der entscheidenden Veröffentlichung durch Farman et al. (1985) wurden Messungen sehr niedriger Ozonwerte über der Antarktis, da solche nicht erwartet wurden, entweder nicht weiter veröffentlicht (1977 und 1983 in der britischen Antarktis-Station Halley Bay) oder als Fehlfunktion des Messinstruments eingeordnet (1981 ebendort) oder aufgrund unterstellter Messfehler der Satellitenmessungen in Computeranalysen automatisch nicht weiter berücksichtigt (1981, 1984 bei der NASA) oder aber als wenig signifikant nicht weiter beachtet (Chubachi 1984; japanische Antarktis-Station).

53 An Bord von Nimbus 7 befinden sich TOMS (Total Ozone Monitoring Spectrometer) und SBUV (Solar Backscatter Ultraviolet Instrument), die laut Parson (2003:84) eindeutige Klarheit über globale Ozontrends zu gewinnen erlaubten.

54 „During the pre-satellite period before 1978/1979 ozone sondes and Umkehr/Dobson measurements provide the only data sets for study of ozone change.” (WMO 1998:101)

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[55], die parallel laufenden Anstrengungen um (internationale) Regulierung[56] und die Abwehrstrategien der FCKW-Hersteller[57] (vgl. 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.

Da zugleich wesentliche Fragestellungen wie abnehmende Ozongehalte in der Stratosphäre oder signifikanter chlorinduzierter katalytischer Ozonabbau wissenschaftlich noch nicht eindeutig (empirisch) entschieden waren, theoretische und experimentelle Werte teils noch differierten und auch unterschiedliche Messergebnisse zu verzeichnen waren[58], war es zu erwarten und keineswegs überraschend, dass sich hieran massive Kontroversen entzündeten, in denen es nicht nur um die Klärung konfligierender wissenschaftlicher Erklärungen und Tatbestände innerhalb des Wissenschaftssystems, auf die in Kapitel 7 etwas genauer eingegangen wird, sondern aufgrund der Überlagerung von wissenschaftlichen, wirtschaftlichen und politischen Positionen und Motivlagen um die wissenschaftlich verbrämte Durchsetzung bestimmter interessegeleiteter Präferenzen und diskursiver Rahmungen ging (vgl. Andersen/Sarma 2002, Benedick 1991, Böschen 2000, Cagin/Dray 1993, Clark/The Social Learning Group 2001, Dotto/Schiff 1978, Kirschten 1992, Liftin 1994, Parson 2003, Roan 1990). Diese Auseinandersetzungen und Dispute schlugen sich in einer beachtlichen Zahl von wissenschaftlichen Konsens anstreben und wiedergeben sollenden Assessment-Aktivitäten nieder, in denen ein mit der Zeit größer werdender Wissensstand, eine wachsende internationale Verbreiterung und Absicherung des Review-Prozesses und damit zunehmend eindeutige bzw. seitens der scientific community als eindeutig anerkannte Befunde zum Ausdruck kamen. Dabei erreichte erst der 1985 erstellte WMO-Report 16 (WMO 1986) einen entsprechenden, auch außerhalb der Wissenschaft (in den Verhandlungen zur Etablierung eines substanziell fundierten internationalen Ozonregimes) akzeptierten Status anerkannter wissenschaftlicher Befunde (vgl. Parson 2003), den vorangehende Untersuchungsprogramme und Assessment-Aktivitäten noch

55 In dieser Zeit übernahm die NASA in den USA die Rolle einer lead agency in der Ozonforschung. „In June 1975 (congress) passed legislation directing NASA ‚to conduct a comprehensive program of research, technology and monitoring of the phenomena of the upper atmosphere.' This language, embodied in the fiscal year (FY) 1976 authorization bill for NASA, gave the Agency a clear mandate to perform research concerned with depletion of the ozone layer." (Lambright 2005:8)

56 Die Wiener Konvention zum Schutz der Ozonschicht von 1985 verfügte anders als das Montreal-Protokoll von 1987 über keine substanziell wirksamen Maßnahmen, die über den UNEP World Plan of Action von 1977 hinausgingen. Lediglich die vorgesehenen Workshops und erneuten Verhandlungen unter Leitung von UNEP erwiesen sich im nachhinein als entscheidende prozedurale Vorkehrungen für zukünftige substanzielle Vereinbarungen (vgl. Parson 2003:122)

57 Johnston (1992:29) beschreibt z.B. die 1970er Jahre so: „ For the next few years, the industry took the initiative in polarizing the situation and , typically, misrepresented the contents of a scientific article and ridiculed the misrepresented portion."

58 Seit den 1960er Jahren fanden systematische Vergleiche unterschiedlicher Messmethoden und -instrumente statt „and critical reviews of air pollution monitoring become routine, leading to an important re-evaluation of the data they generated." (Farrell 2005:68f; Clemitshaw 2004) Es wurde die Validität von Messungen sowohl des stratosphärischen als auch des mit photochemischem Smog verbundenen bodennahen Ozons in Frage gestellt. Ersteres wird in Parson (2003:81-86) dargelegt: „A crucial controversy erupted over whether the existing network of global ozone monitors was even capable of detecting a reduction in stratospheric ozone, especially because calculations indicated that declines in total ozone of only a few percent should have been expected." (Farrell 2005:70) Für letzteres verweist Farrell (2005:69) auf eine vergleichende Studie: „In June 1974 an intercomparison study was revealed to have shown substantial (30%) differences between measurements taken when different official calibration procedures were used."

nicht erlangten, wie insbesondere die Study of Critical Environmental Problems (SCEP) 1970, das Climatic Impact Assessment Program (CIAP) 1971-75 (vgl. Singer 1975), das erste internationale Ozon-Assessment der WMO[59] 1975, die Federal Interagency Task Force on Inadvertent Modification of the Stratosphere (IMOS) 1975, NAS 1975, NAS 1976 (mit der Empfehlung selektiver Regulierung), U.K. Department of the Environment 1976, UNEP World Plan of Action (1977), NAS 1979a, NAS 1979b, NASA 1979, U.K. Department of the Environment 1979, NAS 1982 (mit optimistischeren Befunden, weniger anspruchsvollen, zurückhaltenden Analysen und ohne Empfehlungen), WMO 1982[60], NAS 1984 (mit ähnlichen, noch geringeren Ozonabbau konstatierenden Befunden wie 1982).

3.5 Ozonloch und umfangreiche Ozonforschungsprogramme (~1985 - ~2000)

Die fünfte Phase war geprägt von der unerwarteten Beobachtung des antarktischen Ozonlochs und seiner wissenschaftlichen Erklärung, von der intensiven Erforschung und allmählichen hinreichenden Klärung der wesentlichen mit stratosphärischem Ozon verbundenen atmosphärischen Strukturen und Prozesse, von umfangreicher Förderung der Ozonforschung und diesbezüglich intensiver internationaler Kooperation, und von der erfolgreichen substanziellen Realisierung des Ozonregimes mit zunehmend forciertem weltweiten Auslaufen der Herstellung von FCKWs sowie ersten Anzeichen verringerter FCKW-Mengen (ab 1995 in der Troposphäre, ab ca. 2004 in der Stratosphäre).[61]

Die Entdeckung von gegenüber 1977 um 30-40% niedrigeren Ozonwerten im antarktischen Frühling (Farman et al. 1985) überraschte die scientific community der Ozonforscher völlig, nachdem diese bis dahin ein wenn auch noch in einigen Fragen offenes, aber zunehmend konsistentes, in Messwerten und Modellrechnungen grundsätzlich übereinstimmendes Gesamtbild des stratosphärischen Ozons und seiner Abbauprozesse gewonnen hatte (vgl. WMO 1986; Schiff 1999, BMBF 2000).[62]

Diese Entdeckung führte zu intensiven (teils hektischen) Forschungsaktivitäten, um zum einen u.a. in zwei logistisch und technisch anspruchsvollen Antarktis-Expeditionen (NOZE 1986 und NOZE II

59 unter dem Titel „Modification of the Ozone Layer due to Human Activities and some Possible Geophysical Consequences“

60 Dieser Bericht referiert u.a. den auf vergleichender Auswertung von Satellitenmessungen basierenden Befund des NASA-Wissenschaftlers Heath eines signifikanten Ozonverlusts in der oberen Stratosphäre, der jedoch aufgrund fehlender Verifizierbarkeit der Korrekturen, die an den infolge vermuteter sukzessiver Degradation des Messinstruments verschobenen Messdaten vorgenommen worden waren, keine klare Akzeptanz in der scientific community fand.

61 Allerdings erreichte das antarktische Ozonloch in den Jahren 2006 und 2008 mit 29 und 27 Mio. km^2 die bislang größte Ausdehnung. Unter der Annahme ansonsten unveränderter klimatischer Rahmenbedingungen prognostizieren Modellrechnungen – bei vollständiger Umsetzung der Protokollergänzungen – wieder ansteigende stratosphärische Ozonwerte ab ca. 2010 oder später (2018), eine weitgehende Regeneration der Ozonschicht bis 2050 (vgl. WMO 2003, IPCC/TEAP 2005) oder erst bis 2068 (Newman et al. 2006) oder gar 2100 (WMO 2008) bzw. breitenabhängig unterschiedlich (WMO 2007) und einen anschließenden Rückgang der hierdurch bedingten zusätzlichen Fälle von Hautkrebs (vgl. Abb. 3.3).

62 „Scientific understanding of the behavior of the ozone layer prior to Farman et al.'s discovery suggested that trends of a few percent in total ozone might begin to become observable sometime in the twenty-first century if chlorofluorocarbon emissions continued.” (Solomon 1999:283)

1987) eindeutige empirische Daten hinsichtlich seiner möglichen Ursachen zu gewinnen und zum andern die Entstehung des von Rowland 1986 erstmals so genannten öffentlichkeitswirksamen Ozonlochs theoretisch korrekt zu erklären (vgl. Brasseur 1987, Solomon 1988).

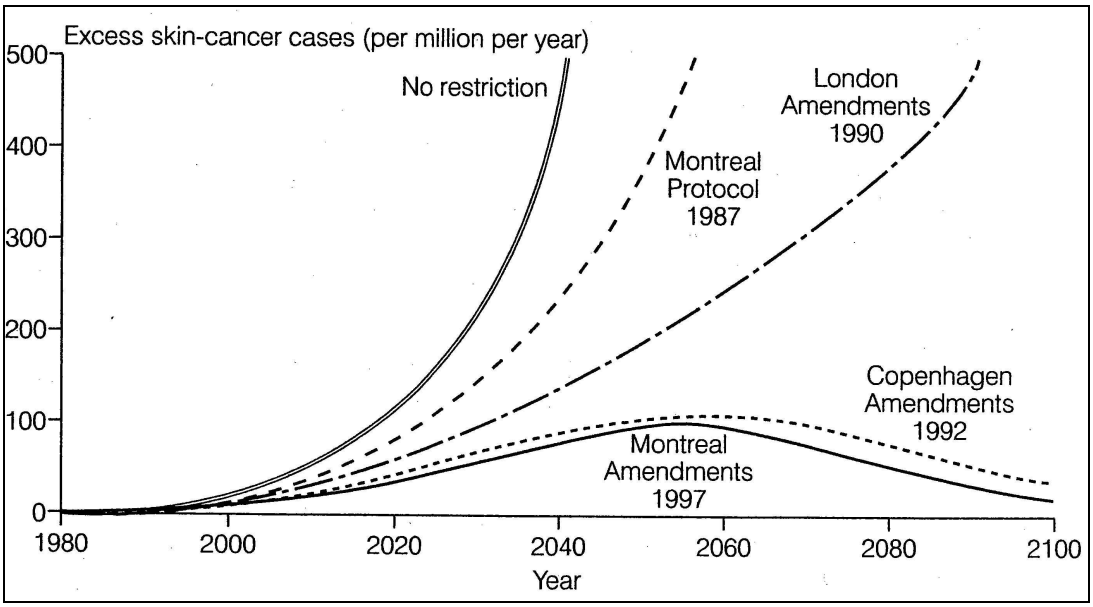

Abb. 3.3: Prognostizierte zusätzliche Fälle von Hautkrebserkrankungen, 1980 – 2100
Quelle: Andersen/Sarma 2002:349

Unter den anfangs konkurrierenden Erklärungen (dynamische, vulkanische, chemische, Sonnenzyklus-Hypothese) stellte sich die folgende als zutreffende heraus (vgl. BMBF 2000, Crutzen/Arnold 1986, Solomon et al. 1986, Solomon 1999, Toon et al. 1986, WMO 1989, 1992, 1995, 1999, 2003):

Durch die Photolyse von FCKWs in der Stratosphäre wird Chlor (und analog auch Brom aus Halonen) zunächst primär in Reservoirgasen, im Wesentlichen HCl und $ClONO_2$, gespeichert[63] und aufgrund des mittleren stratosphärischen Meridionaltransports u.a. zur Antarktis transportiert.[64] Wegen der fehlenden Sonneneinstrahlung in der Polarnacht kühlt sich die Luft stark ab und sinkt nach unten. Dadurch bildet sich über der Antarktis – aufgrund der relativ homogenen konzentrischen Verteilung der Landmassen stärker als über der Arktis – ein sehr stabiler kalter Polarwirbel aus, in dem sich trotz des geringen Wasserdampfgehalts der Stratosphäre bei weniger als –80°C

63 Diese werden bei Temperaturen über –80°C nur in kleinen Mengen in aktives, ozonzerstörendes Chlor umgesetzt. Ohne die ‚natürliche' Bildung dieser Reservoirgase hätten die FCKW-Emissionen zu weit stärkerem Ozonabbau mit viel intensiverer UV-B Strahlung auf der Erde geführt.

64 Die Stärke dieses Transports variiert jahreszeitlich und hängt u.a. stark von der Vortizität des Polarwirbels ab.

polare stratosphärische Wolken[65] (PSCs) bilden können. An den diese PSCs konstituierenden Eiskristallen und Aerosolen können nun heterogene Reaktionen[66] ablaufen, wodurch chemische Reaktionen möglich werden, die in der reinen Gasphase (mit nur homogenen Reaktionen) nicht oder nur sehr langsam möglich wären (vgl. BMBF 2000, Peter 1997, Solomon 1999).[67] Dadurch kommt es zu stratosphärisch relevanten Reaktionen von Gasen auf festen Oberflächen oder in der flüssigen Phase von Aerosol- oder Wolkenteilchen, in denen insbesondere Chlor aus Reservoirgasen zu Cl_2 und HOCl um- und freigesetzt wird, die dann bei Sonneneinstrahlung im (antarktischen) Frühling durch Photolyse rasch zu Chlorradikalen werden (vgl. Brasseur et al. 1999). Diese setzen den katalytischen Ozonabbau in Gang, wobei der separate ClO-Dimer-Zyklus bei Vorliegen hoher ClO-Konzentrationen ohne Sauerstoffatome abläuft und besonders bei tiefen Temperaturen sehr effizient ist.[68] Zugleich werden einerseits in den heterogenen Reaktionen potenziell konkurrierende NO_x-Gase durch Überführung in HNO_3 inaktiviert (Denoxifizierung) und andererseits durch Sedimentation in Form von NAT-Teilchen räumlich entfernt (Denitrifizierung), sodass Chlor stärker aktiviert werden kann.[69]

Insgesamt werden an dieser Erklärung (vgl. Abb. 3.4) die komplexen dynamischen, chemischen und photolytischen Zusammenhänge atmosphärischer Phänomene wie hier des Ozonlochs deutlich, weshalb sich seine chemischen und atmosphärendynamischen Ursachen nicht unabhängig voneinander behandeln lassen: die chemisch-physikalischen Prozesse sind extrem temperaturabhängig und gehen daher eine starke Kopplung an die meteorologischen Prozesse in der Polarregion ein. Dadurch wird auch verständlich, weshalb es über der Arktis (bislang) zu keinen ausgedehnten und dauerhaften Ozonlöchern kam, was zu Beginn der stärker von der europäischen Ozonforschung dominierten, ab 1988 verfolgten arktischen Kampagnen befürchtet worden war.[70]

An weiteren spezifischen relevanten Ergebnissen der Ozonforschung in dieser Phase seien darüber hinaus aufgeführt:

---

65 Polare stratosphärische Wolken sind Wolken in der ansonsten wolkenfreien unteren Stratosphäre, deren Bestandteile – außer Wasser zumeist Salpetersäure (HNO_3) und Schwefelsäure (H_2SO_4) – flüssig oder gefroren sind. „Bei niedrigen Temperaturen unter etwa –70°C beginnen die flüssigen Tröpfchen HNO_3 und andere lösliche Spurengase aufzunehmen, wachsen dadurch unterhalb etwa –81°C massiv im Volumen an und erklären PSCs vom Typ 1 als flüssige Lösungströpfchen. Unterhalb des Frostpunktes bei etwa –85°C können Wassereis-Kristalle in den Teilchen entstehen und damit zu optisch dichten PSCs vom Typ 2 führen.“ (BMBF 2000:59)

66 Heterogene Reaktionen sind chemische Reaktionen unter Beteiligung mehrerer Phasen: gasförmig, flüssig, fest.

67 In der Tendenz sind die flüssigen PSCs (Typ 1b) die wesentlichen Träger der heterogenen Chemie der Chloraktivierung, während die Salpetersäure-Trihydrat (nitric acid trihydrate (NAT): $HNO_3(H_2O)_3$) enthaltenden flüssigen PSCs (Typ 1a) als auch die festen, sich erst bei tieferen Temperaturen unter –85°C bildenden PSCs (Typ 2) aufgrund ihrer volumenbedingten rascheren Sedimentation ($v \sim r^2$) entscheidend zur Denitrifizierung der mittleren ozonreichen Stratosphäre beitragen (vgl. BMBF 2000:59).

68 Insofern Halogenaktivierung und Ozonabbau grundsätzlich verschiedene Vorgänge sind, die sequenziell ablaufen, muss intensive Chloraktivierung nicht immer einen starken Ozonabbau zur Folge haben (vgl. BMBF: 2000:74).

69 „Da nicht nur die Kinetik des Dimer-Zyklus, sondern auch die Bildung der PSCs, die für die heterogene Chloraktivierung verantwortlich sind, von der Temperatur abhängig ist, ergibt sich eine extrem enge Ankopplung der Ozonzerstörung an die meteorologischen Umgebungsbedingungen.“ (BMBF 2000:22)

70 Ein arktisches Ozonloch wäre politisch und sozial besonders prekär, weil der nördliche Polarwirbel aufgrund planetarer Wellen weit nach Süden bis über Europa verschoben werden kann und weil aufgrund seiner seitlichen Erosion abgelöste ozonarme Luftmassen die Ozonschicht regional und temporär zusätzlich abschwächen können.

– Unter Berücksichtigung der ausgesonderten Satelliten-Messdaten bestätigte die NASA 1986 den von Chubachi (1984) und Farman et al. (1985) in bodengestützten Messungen festgestellten starken Ozonverlust in der Antarktis (vgl. Stolarski et al. 1986).

– Die Schlüsselrolle von Chlor bei der Entstehung des Ozonlochs wurde durch das Airborne Antarctic Ozone Experiment (AAOE) im Rahmen von NOZE II 1987 definitiv nachgewiesen.

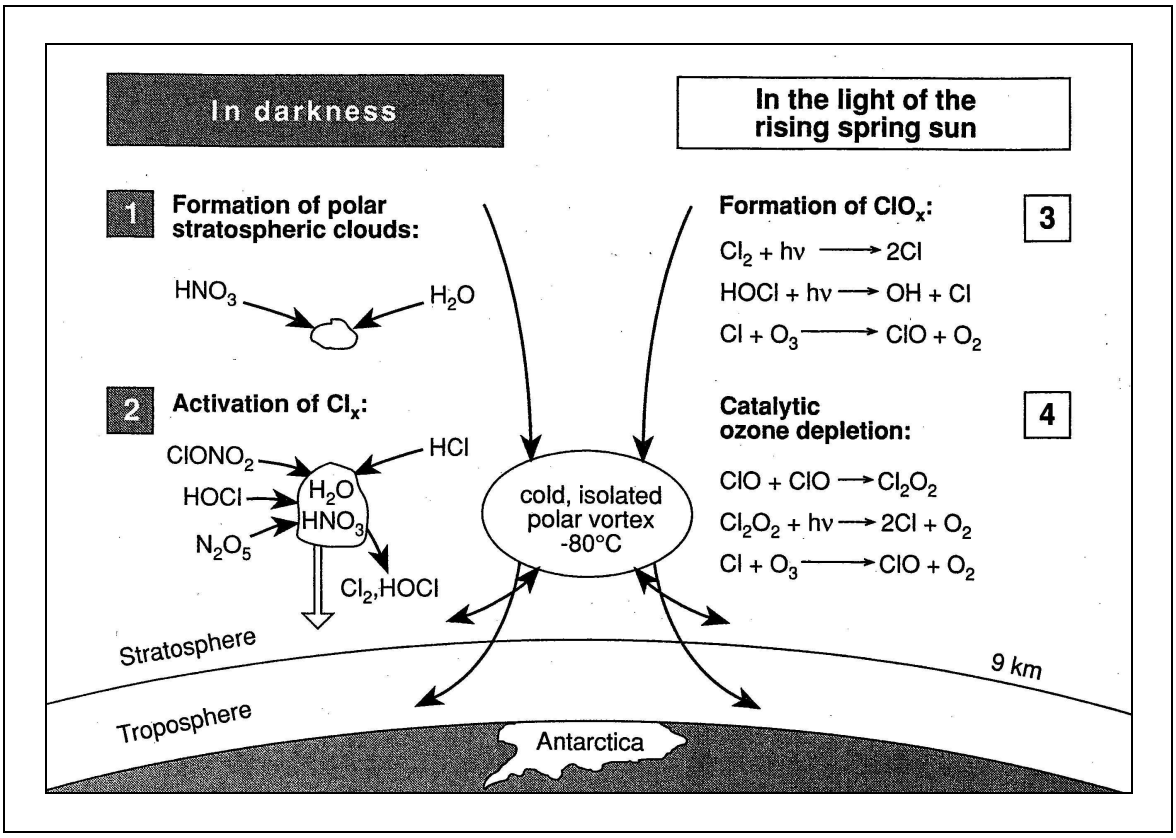

Abb. 3.4: Schema der dynamischen und chemischen Prozesse, die zur Ozonzerstörung in antarktischen Polarwirbel führen, wobei Prozesse (1) und (2) während der Polarnacht stattfinden, während Prozesse (3) und (4) Sonnenlicht benötigen.
Quelle: Brasseur et. al. 1999 :504

– Der Befund eines durchgängigen Ozonabbaus von rund 10% pro Dekade in der (unteren) Stratosphäre (vgl. Abb. 3.5) wurde ab 1987 durchweg akzeptiert und 1991 von Stolarski et al. durch Satellitenmessungen außer in den Tropen detaillierter nachgewiesen (vgl. WMO 1992, Staehelin et al. 2001, Fioletov et al. 2002).

– Bei deutlichen jährlichen Variationen wurden zusammengenommen in 1999 – und nunmehr (nach Fertigstellung dieser Studie) in 2006 – die bislang größte Ausbreitung des Ozonlochs und die stärkste Ozonabnahme über der Antarktis71 und im Winter 1999/2000 auch die niedrigsten Ozongehalte in der polaren Nordhemisphäre gemessen (WMO 2003).

71 Je für sich genommen wurden 1995 noch leicht geringere Ozonwerte und 2001 (und 2005) eine noch etwas größere Ausdehnung des Ozonlochs gemessen.

- Messwerte im Gefolge der Vulkanausbrüche des Pinatubo 1991 als auch bereits des El Chichon 1982 belegten deren Einfluss auf die Ozonschicht durch die Injektion beträchtlicher Mengen von SO2 in die Stratosphäre, was die Bildung von schwefel-säurehaltigen Aerosolen als potenziellen Kondensationskeimen für katalytische Ozonabbaureaktionen verstärkte.
- Allgemein wurde durch derartige (ereignisbezogene) Messungen präziser aufgezeigt, wie sehr naturbedingte Variationen wie Vulkanausbrüche, Sonneneruptionen, solare Zyklen, planetare Wellen72 oder die Vortizität des Polarwirbels zu starken natürlichen Schwankungen der Gesamt-Ozonkonzentration und des stratosphärischen Ozongehalts führen, weshalb der Nachweis eines durch FCKWs verursachten Ozonabbaus so langwierig und schwierig war.
- In den 1990er Jahren wurden neben geringeren ODPs von FCKW-Substituten zunehmend auch deren teils deutlich höhere GWPs (global warming potentials) festgestellt, was deren Umweltverträglichkeit vielfach zunehmend fraglich werden ließ.

72 Planetar(isch)e Wellen sind „ausgeprägte wellenförmige Deformationen des primär zonalen Westwindgürtels, der in beiden Hemisphären das dominierende zirkumpolare Strömungsfeld darstellt. Sie sind besonders ausgeprägt in der mittleren bis oberen Troposphäre, wo sie für einen intensiven meridionalen Austausch von Wärme- und Bewegungsenergie sorgen (vgl. BMBF 2000:127).

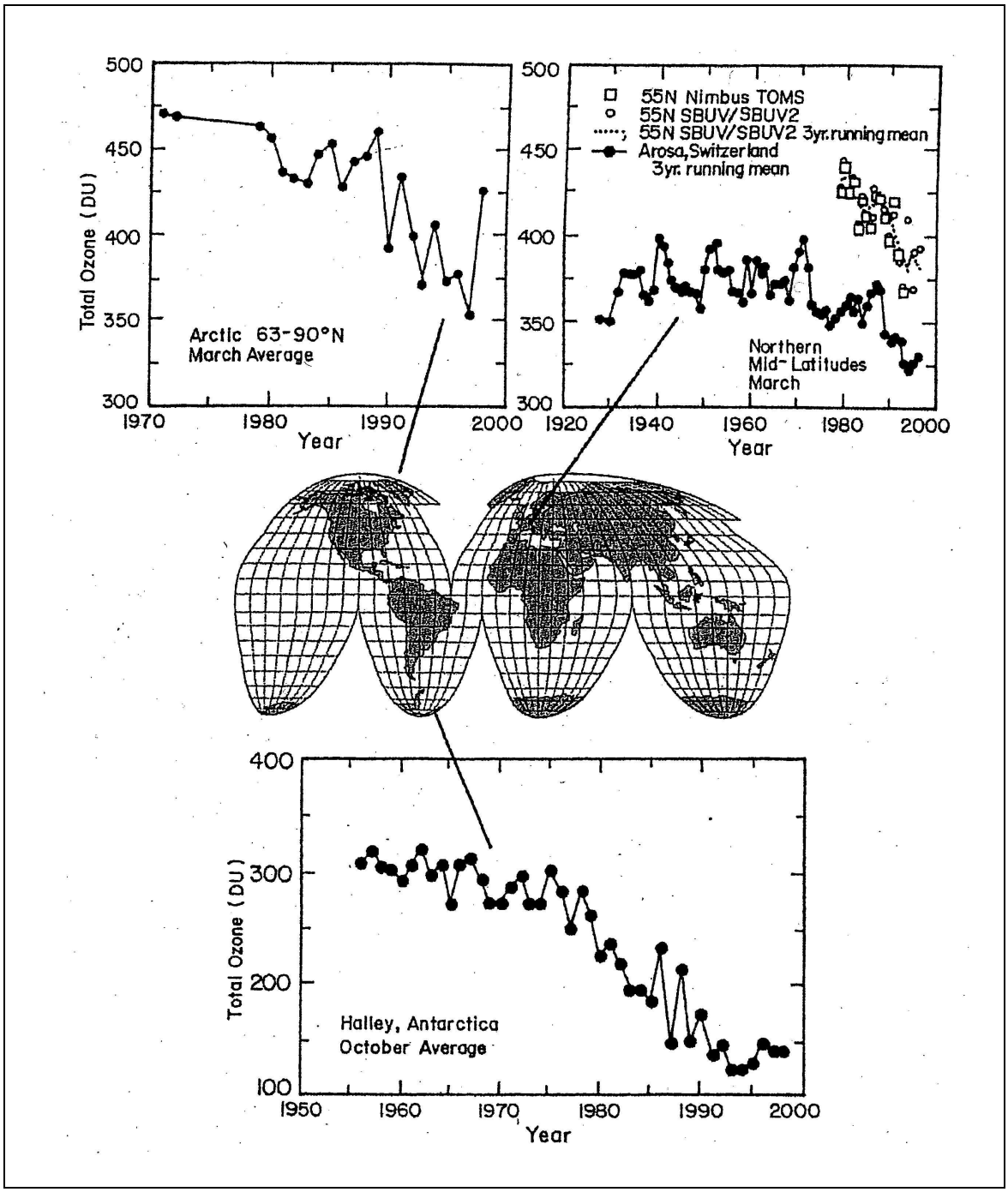

Abb. 3.5: Beobachtete Gesamtozonwerte in Antarktis, Arktis und Arosa/Schweiz
Quelle: Solomon 1999:276

– Generell kam es zu einer weiteren Verbesserung und größeren Vielfalt der Messverfahren, die präzisere und weitergehende Messungen erlaubten.73 Genannt seien etwa die Mikrowellen-Messtechnik, laserbasierte Lidar-Technik (Light Detection And Ranging), Infrarotgeräte (Mi-

73 „By using powerful computers to process data obtained from laser-based instruments onboard aircraft and satellites, researchers gained the ability to quickly and accurately measure ozone concentrations in three dimensions for large parts of the atmosphere and to display the results visually.“ (Farrell 2005:71)

chelson Interferometer für Atmosphärische Sondierung: MIPAS) und Aerosoldetektoren (vgl. BMBF 2000). Zugleich kamen unterschiedliche Messplattformen, die alle ihre Vor- und Nachteile aufweisen74, zum aufeinander abgestimmten Einsatz: Bodenstationen, Messflugzeuge, Forschungsballone (einschließlich Radiosonden und Ozonsonden), Satelliten75 und 1997 auch die amerikanische Raumfähre.76 Dabei wurden auch verstärkt systematische Evaluationen der verschiedenen Messungen, Messinstrumente und Berechnungsmethoden in Angriff genommen (vgl. WMO 1998), um die Validität der erhobenen Daten zu verbessern.

– Die gleiche Messergebnisse gewährleistende Kalibrierung unterschiedlicher Messverfahren bleibt auch weiterhin eine bedeutsame Aufgabe.77

– Tabelle 1 gibt einen Überblick über globale Programme zur Messung und Analyse von Ozon und UV-Strahlung.

– So konnten z.B. PSC-Teilchen 1998 mit einem ballongetragenen In-situ-Massenspektrometer erstmals chemisch analysiert werden (Schreiner et al. 1999).

– Ebenso wurden etwa thermodynamische Eigenschaften, kinetische Eigenschaften, Phasenumwandlungen und heterogene Reaktionen in Laborexperimenten präzise untersucht, um die physikalischen und chemischen Eigenschaften der PSC-Teilchen zu bestimmen, wofür empfindliche und spezifische Messverfahren im Labor entwickelt werden mussten. Danach verlaufen die Reaktionen von Brom-Verbindungen in der Regel deutlich schneller als die der entsprechenden Chlor-Verbindungen, weshalb sich das Verhältnis von BrOx zu ClOx als Folge heterogener Aktivierung zu Gunsten von BrOx verschoben hat (vgl. BMBF 2000:80).

– Simulationsmodelle78 wurden unter Einbeziehung vielfältiger Einflussfaktoren sukzessive so weit differenziert, dass sie Entwicklungen der stratosphärischen Ozonschicht in vielen Fällen recht gut wiederzugeben vermögen (vgl. WMO 2003). Mit zunehmender Komplexität der Modelle werden die Unsicherheiten in den Ergebnissen dabei größer, weil die Interpretation der Ergebnisse aufgrund der Vielfalt der Wechselwirkungen zwischen den berücksichtigten Prozessen immer anspruchsvoller wird und dabei vielfach Parametrisierungen der Prozesse verwendet werden müssen. Die Ergebnisse von ersten seit Ende der 1990er Jahre parallel durchgeführten dreidimensionalen Studien, bei denen ein Klimamodell gekoppelt mit einem nichtlinearen Chemiemodell eingesetzt wurde, stimmten mit ähnlichen, aber einfacheren Modellab-

74 Während z.B. bodengestützte Fernmessungen genaue Punktmessungen liefern, tasten Satelliten tendenziell den gesamten Globus ab, müssen jedoch an den überflogenen Bodenstationen kalibriert werden.

75 Bei Satelliten wird zwischen Messungen gegen die direkte Sonne (Stratospheric Aerosol and Gas Experiment SAGE) und solchen nach unten (Tiros Operational Vertical Sounder TOVS, Total Ozone Monitoring Spectrometer TOMS, Solar Backscatter UV SBUV, Global Ozone Monitoring Experiment GOME) unterschieden.

76 Erwähnenswert ist in diesem Kontext, dass der amerikanische TOMS-Satellit 1991 mithilfe der russischen Meteor-3 Rakete ins All gebracht wurde, nachdem die Challenger-Fähre 1986 explodiert war und russische und amerikanische Wissenschaftsadministratoren daraufhin eine entsprechende Kooperation (entgegen ihren eigenen anfänglichen Erwartungen) erfolgreich in Gang gesetzt hatten.

77 „Current differences of the order of 5-15 DU between GOME, TOMS and ground-based total ozone measurements still need to be resolved to allow reliable assessment of changes in trend after 1995 in comparison to the pre-Pinatubo trend.” (EU-Commission 2001:29)

78 Modellsimulationen erlauben es, bei der Analyse einer Vielzahl dynamischer und/oder chemischer Größen Konsistenz zu erreichen und Sensitivitätsstudien durchzuführen, um die Bedeutung verschiedenerer atmosphärischer Größen und Parameter zu erforschen.

schätzungen gut überein. Dabei sind die Ozonschicht behandelnde Klima-Chemie-Modelle (CCMs) teils einfacher als avancierte komplexe Klimamodelle, sofern sie sich im Wesentlichen auf Modellierungen dynamischer, chemischer und photochemischer Prozesse in der

Tab. 3.1: Globale Programme zur Messung und Analyse von Ozon und UV-Strahlung
Quelle: Andersen/Sarma 2002:27

ggf.Several global programmes an integrate monitoring and research of ozone and ultraviolet radiation. The Global Atmosphere Watch (GAW), established by WMO in 1989, integrates WMO's atmospheric research and monitoring activities. Six World Date Centres collect, process, analyse and distribute data:

1. Ozone and UV-B radiation: World Ozone and Ultraviolet Radiation Centre, Toronto, Canada,
2. Greenhouse and other trace grass: World Data Centre for Greenhouse Gases, Tokyo, Japan
3. Solar radiation: World Radiation Data Centre, St. Petersburg, Russian Federation.
4. Aerosols: World Data Centre for Aerosols, Ispra, Italy, operated by the European Union
5. Precipitation chemistry: World Data Centre for Precipitation Chemistry, Ashville, NC, USA
6. Surface ozone: World Data Centre for Surface Ozone (WDCSO3), Oslo, Norway

The Network of the Detection of Stratospheric Change (NDSC), which began in January 1991, measures ozone and key ozone-related chemical compounds and parameters at remote-sounding research stations. The NDSC has the following working groups. Dobson and Brewer, Fourier Transform Infrared spectrometer (FTIR), Light Detection and Ranging (LIDAR), Microwave, Ozonesondes and Aerosol Sondes, Satellite, Spectral UV, Theory and Analysis, and UV/Visible.

In 1989, the Stratospheric Ozone Intercomparison Campaign (STOIC) was carried out at Table Mountain Observatory in California.

In 1992, the World Ozone Data Centre, created in 1960 by Environment Canada for WMO, became the World Ozone and Ultraviolet Radiation Centre (WOUDC)

In 1995, the Global Ozone Monitoring Experiment (GOME) was launched on board the European Space Agency's Earth Remote Sensing satellite (ERS-2) to measure total column amounts and vertical profiles of ozone and several trace gases such BrO, OC1O, and NO2.

Several campaigns and satellite programmes are planned for the near future, among them the Stratosphere Aerosol and Gas Experiment 8SAGE III), Global Ozone Monitoring Experiment (GOME-2), the Ozone Mapping and Profiling Suite (OMPS), and the Infrared Atmospheric Sounding Interferometer (IASI).

Stratosphäre beschränken (können) und nicht noch Hydrosphäre und Biosphäre im Modell ankoppeln (müssen).[79]

– Zunehmend gerieten in der Ozonforschung die Wechselwirkungen zwischen Klima und Ozonchemie in den Blickpunkt (vgl. Abb. 3.6). So geht z.B. die Erhöhung der Treibhausgaskonzentrationen mit einer Erwärmung der Troposphäre und einer gleichzeitigen Abkühlung der Stratosphäre einher. Letztere führt tendenziell zu einer Zunahme an PSCs und einem infolge der niedrigeren Temperaturen länger stabil bleibenden Polarwirbel und infolgedessen wahrscheinlich zu einem effektiveren und länger anhaltenden Ozonabbau. Außerdem dürfte erstere eine Verstärkung der konvektiven Prozesse und damit einen stärkeren Schadstofftransport in die Stratosphäre bewirken. Zugleich kann die troposphärische Erwärmung auch zu einer größeren atmosphärischen Wellenaktivität führen, die der Abkühlung entgegenwirkt. Schließlich kann parallel dazu das Ozon in niedrigen und mittleren Breiten ebenso zunehmen, weil eine Abkühlung in der oberen Stratosphäre außerhalb der Polarregionen eine Verlangsamung der homogenen, ozonabbauenden Reaktionen zur Folge hat (BMBF 2000:121).

79 Für die Troposphäre modellierende, in die Stratosphäre und Mesosphäre vertikal erweiterte CCMs gilt eine solche Aussage allenfalls eingeschränkt.

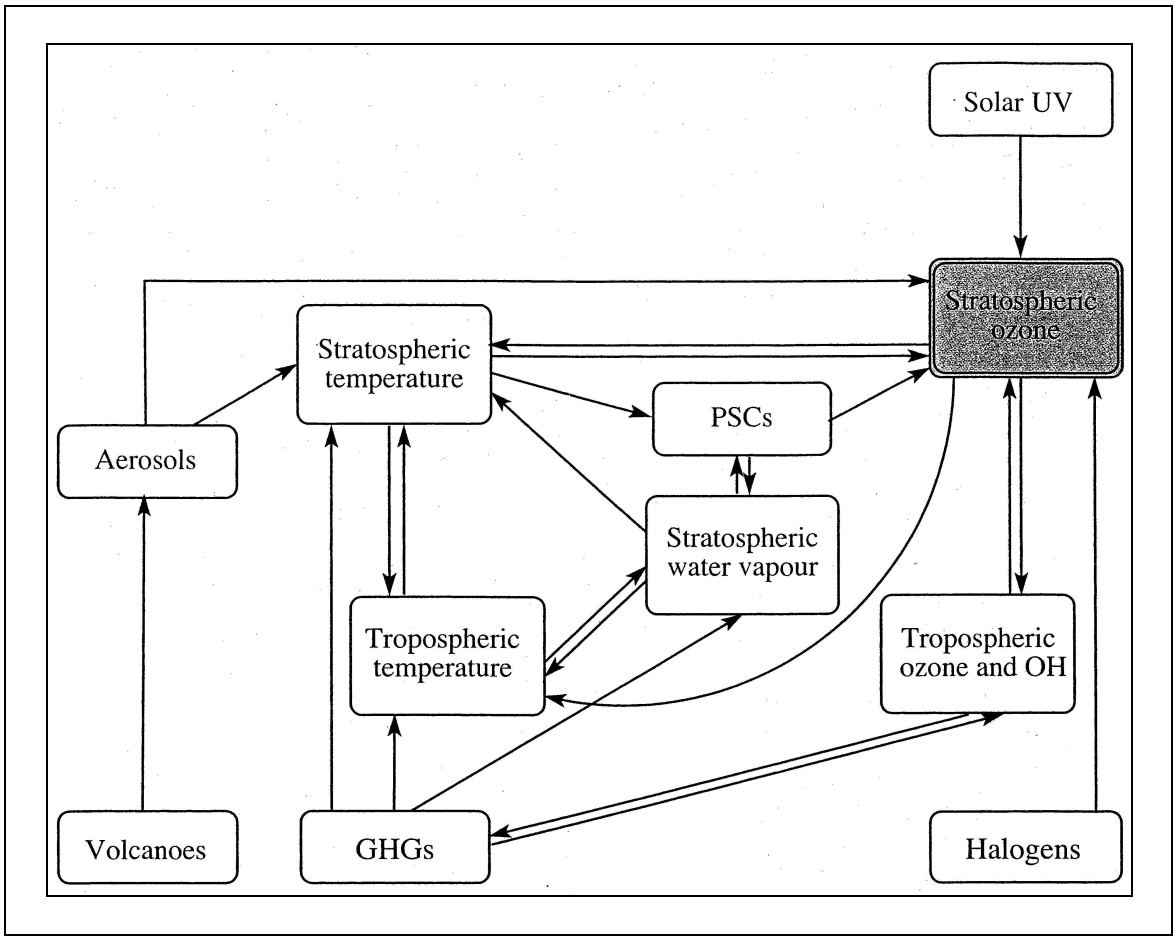

Abb. 3.6: Schematisches Diagramm der entscheidenden stratosphärisches Ozon beeinflussenden Prozesse und ihre Verbindung mit Klimaveränderungen
Quelle: EU-Commission 2001:193

– In diesem Zusammenhang kann auch die verstärkte Untersuchung des troposphärischen Ozons gesehen werden, das – anders als das stratosphärische Ozon – seit dem 19. Jahrhundert und verstärkt in den letzten Jahren zugenommen hat, und dies nicht nur aufgrund der forcierten Ozonbildung in städtischen und industriellen Ballungsgebieten (vgl. Hauglustaine/Brasseur 2001). Grundsätzlich spielt Ozon trotz seiner gegenüber der Stratosphäre niedrigen Konzentration auch in der dynamisch turbulenten Troposphäre (mit rascher ablaufenden Abbauprozessen und infolgedessen einer Unzahl an chemischen Reaktionen) nicht nur als nach CO2 und CH4 drittwichtigstes anthropogenes Treibhausgas (Andreae et al. 2002) eine Schlüsselrolle, weil seine Photolyse zu O(1D) und dessen Reaktion mit H2O zur Bildung von hochreaktiven OH-Radikalen führt (Levy 1971), die eine signifikante Akkumulation von Spurengasen, vor allem von reduzierten Kohlenstoff-, Schwefel- und Stickstoff-verbindungen in der Troposphäre verhindern. NOx-Spurengase haben eine entscheidende katalytische Wirkung auf die signifikante Bildung von Ozon in der freien Troposphäre (1-12 km Höhe) und bestimmen seine Produktionsrate. Deren Quellen und Verteilung sind jedoch nicht gut bekannt. Daher hat die koordinierte Durchführung von Feldmessungen, Labormessungen und Modellstudien eine wichtige Rolle eingenommen, um den troposphärischen Ozonhaushalt (vgl. Tabelle 2) in Verbindung mit NOx-Produktion und
-Verteilung sowie Oxidationsprozessen von Methan (CH4) und Kohlenmonoxid (CO) quantitativ genauer zu erfassen (Brasseur et al. 1999, Crutzen 1999).

Tab. 3.2: Globale Ozonbildung, -zerstörung und -nettoproduktion in Regionen der Troposphäre im Sommer
Quelle: Brasseur et al. 1999:478

	Production	*Loss*	*Net Production*	*O_3 Burden*
Industrial boundary layer (0 to 1.5 km)	26	18	8	1%
Oceanic boundary layer (0 to 0.5 km)	0	20	−20	<5%
Clean continental boundary layer (0 to 1.5 km)	?	?	?	<5%
Free troposphere (1 to 12 km)	96	89	7	>90%
Stratospheric flux	NA	NA	20	NA

[a] All expressed in units of 10^{28} molecule s^{-1}.
The average stratospheric flux is shown under the net production column.
The percent ozone burden of each region is also listed.

Nachdem es naNachdem es nach der prinzipiellen Entdeckung und Erklärung des chlorinduzierten katalytischen Ozonabbaus in der Stratosphäre (Molina/Rowland 1974) von 1974 bis 1985 aufgrund der bestehenden konfligierenden Akteurkonstellation, Interessenlagen, Messdaten und Erklärungsmodelle einen weitgehenden Stillstand hinsichtlich substanzieller ozonbezogener Regulierungen und FCKW-Substitution gegeben hatte (vgl. Parson 2003), ging die weitgehende soziale Schließung der Kontroversen insbesondere durch das wissenschaftlich weltweit anerkannte WMO Assessment (WMO 1986) und den Nachweis der Schlüsselrolle von Chlor bei der Entstehung des antarktischen Ozonlochs (smoking gun) ab 1985 mit zunehmend eindeutigen Positionierungen und Aktionen der Hauptakteure einher. Zugleich wurde das internationale Ozonregime wirksam etabliert und sukzessive erweitert und forciert:

– Als die gesundheits- und umweltpolitische Relevanz einer Schädigung der Ozonschicht durch FCKWs wissenschaftlich grundsätzlich akzeptiert war80, wurde im Zuge der Formulierung und Umsetzung entsprechender Regulierungsmaßnahmen auch die baldige genauere Erforschung des Ozonproblems politisch vordringlich. Dementsprechend flossen vor allem in den USA, Deutschland (vgl. BMBF 1990, 2000), England und Frankreich ab Ende der 1980er Jahre umfangreiche Fördermittel in die Ozonforschung, um im Rahmen der forcierten Forschungskampagnen81 insbesondere die hierfür erforderlichen teuren Messplattformen wie Satelliten, Forschungsflugzeuge82 oder Forschungsschiffe zu finanzieren.83 Dabei war die internationale

80 Interessanterweise spielten im politischen und administrativen Diskurs nur die kontroversen Auffassungen über die Ursachen des stratosphärischen Ozonabbaus und diesbezügliche präventiv ausgerichtete Maßnahmen, kaum aber die wissenschaftliche Absicherung anzunehmender gesundheits- und umweltschädigender Auswirkungen der UV-Strahlung und diesbezügliche korrektive Schutzmaßnahmen eine Rolle.

81 Diese stärkten zudem indirekt das (forschungs)politische Standing eines Landes in den fortlaufenden Vertragsverhandlungen im Rahmen des Ozonregimes.

82 So verschlang z.B. bereits die auch militärisch begründete Entwicklung des nie zum Einsatz kommenden Forschungsflugzeugs Strato 2C ca. 50 Mio €.

und multidisziplinäre Kooperation der Ozonforscher besonders im Rahmen der jeweiligen Ozonforschungsprogramme ausgeprägt und überwog reputationsbezogene Konkurrenz und Geheimhaltung.[84]

– Die Wiener Konvention (1985) und das Montreal-Protokoll (1987) traten 1989 in Kraft. Es erweiternde und verschärfende Ergänzungen wurden von den Vertrags-parteien vereinbart und traten in Kraft: London (1990, 1992), Kopenhagen (1992, 1994), Montreal (1997, 1999), Peking (1999, 2002). Ein Global Environment Facility Fund (GEF) wurde 1991 etabliert, um Entwicklungsländern und später auch Übergangsländern (z.B. Russland) Mittel zum Verzicht auf und zur Substitution von FCKWs zur Verfügung stellen zu können (vgl. Andersen/Sarma 2002, UNEP 2003).

– Entscheidend für die politische Durchsetzbarkeit dieser Ergänzungen war der installierte kontinuierliche, umfangreiche, international verankerte Monitoring und Assessment Prozess. Die Glaubwürdigkeit gerade der nachfolgenden (sich auch mit anderen, etwa teilhalogenierten Kohlenwasserstoffen (HFCKWs und HFKWs befassenden) WMO-Reports (WMO 1988, 1989, 1992, 1995, 1998, 1999, 2003) wurde nicht mehr in Frage gestellt.85 Diese vorrangig auf wissenschaftliche Befunde fokussierenden Assessments bildeten die Grundlage für die handlungsleitende Übernahme wissenschaftlich autorisierter Forschungsergebnisse seitens politischer und ökonomischer Akteure (vgl. Parson 2003).

– Die Vorgaben des Montreal-Protokolls und seiner Ergänzungen wurden und werden in den Industriestaaten vielfach rasch und teils sogar vorzeitig über nationale Regulierungen umgesetzt.

– Die FCKWs herstellende und verwendende Industrie veränderte ab 1986 innerhalb von zwei Jahren ihre Position86, entwickelte teils kooperativ alternative Produkte und Verfahren87, wobei allerdings häufig HFCKWs wie HFC 134a als Substitute eingesetzt wurden, die zwar überwiegend keine ODPs mehr, jedoch noch ähnlich große GWPs aufwiesen, und forcierte die Einstellung der FCKW-Produktion sowie den Übergang zu alternativen, auf die Nutzung von FCKWs verzichtenden industriellen Prozessen. Dieser Prozess war in den Industriestaaten um 2000 – bei allerdings wachsender bzw. anhaltender Produktion und Verwendung von HFCKWs und Methylbromid (vgl. Oberthür 2001) – bereits weitgehend abgeschlossen (vgl. Abb. 3.7). In den Entwicklungsländern und Übergangsökonomien verlief und verläuft er zumeist zeitlich versetzt und langsamer, wobei das Problem von FCKW-Schwarzmärkten eine signifikante Rolle spielt(e).

83 Erst in diesem Kontext wurden systematische genauere Messungen der UV-Strahlung vorgenommen. International koordinierte Anstrengungen der UV-Forschung begannen erst Anfang der 1990er Jahre, also erst rund 20 Jahre nach der Wahrnehmung eines durch FCKWs verursachten Ozonproblems.

84 Während die US-amerikanische Ozonforschung in der Antarktis eindeutig dominierte, wurde die europäische Ozonforschung für den Bereich der Arktis führend, auf die sich z.B. das deutsche Ozonforschungsprogramm konzentrierte (vgl BMBF 2000, EU-Commission 2001).

85 Die Berichte des 1988 installierten International Panel on Climate Change (IPCC) sind nach einem ähnlichen Muster mit tendenziell stärkeren Politikempfehlungen aufgebaut.

86 Exemplarisch verdeutlichen dies entsprechende Verlautbarungen des jeweiligen Vorstands des Marktführers DuPont: „If credible scientific data developed in this experimental program [of research into the ozone depletion theory financed by the Manufacturing Chemists Association] show that any chlorofluorocarbons cannot be used without a threat to health, DuPont would stop production of these compounds." (1974) "Our position during 1981-82 is the same as our position today; that is, that there are no commercially available substitutes for CFCs-11, 12 and 113 in spite of our substantial efforts." (1987) No evidence yet suggested CFCs should be dramatically reduced. (4.3.1988) DuPont accepts the scientific evidence of the Ozone Trends Panel's conclusions linking CFCs and ozone depletion and becomes the first ODS (ozone depleting substances) producer to commit to "an orderly transition to phase-out of fully halogenated chlorofluorocarbon production." (24.3.1988)

87 Bei diesem Prozess spielte das TEAP eine maßgebliche Rolle (vgl. Andersen/Sarma 2002, Parson 2003).

– Dabei gab es (nicht unerwartet) in diesen Jahren auch publizistisch verstärkte politische und wirtschaftliche Gegenströmungen, die die zentralen (wissenschaftlichen) Grundlagen des Ozonregimes auf der Basis von aus den 1970er Jahren stammenden, überholten Argumenten leugneten (vgl. Grundmann 1999:84ff). Diese Gegenströmungen spielten jedoch innerhalb der Wissenschaft keine Rolle und blieben politisch auch weitgehend erfolglos.

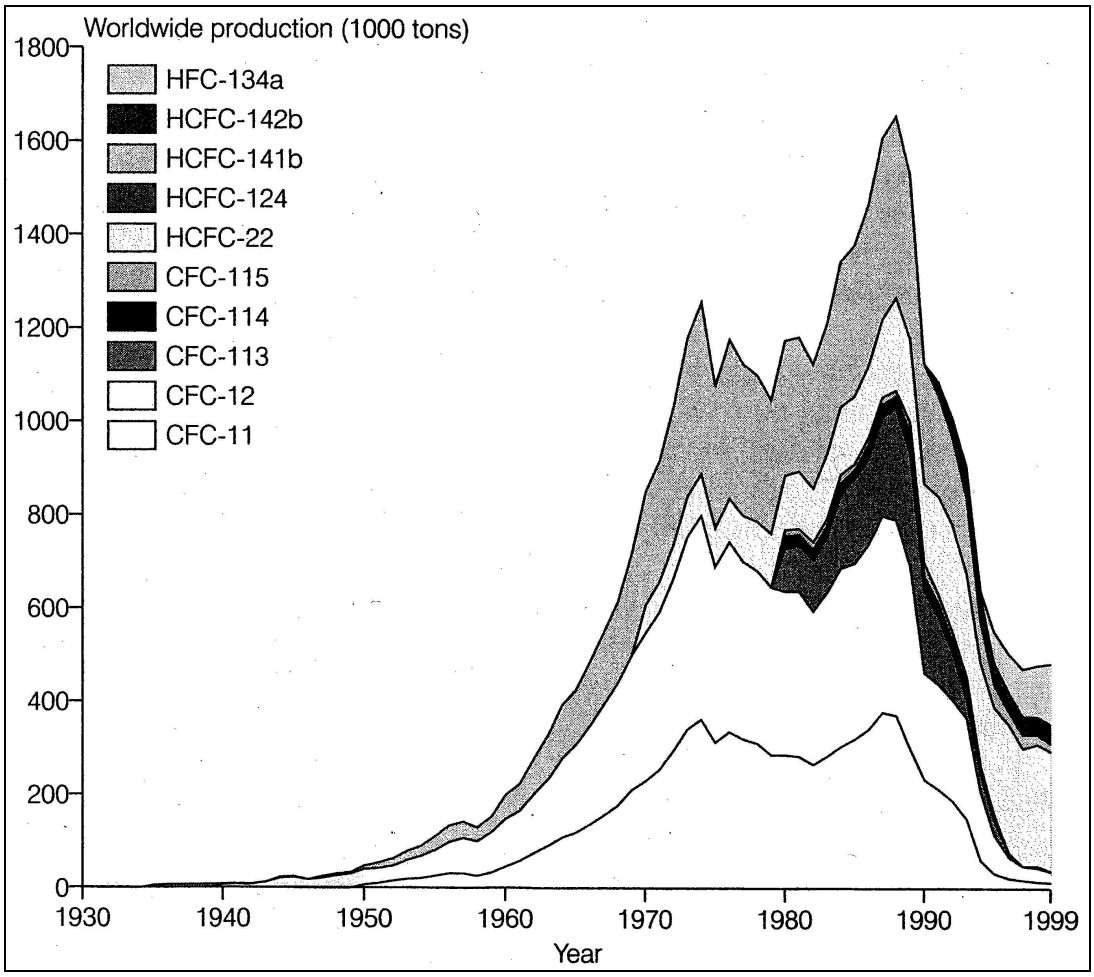

Abb. 3.7: Weltweite Produktionsmengen ozonzerstörender Substanzen
Quelle: Andersen/Sarma 2002:348

Zusammenfassend sei für diese fünfte Phase noch einmal festgehalten:

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 multi-disziplinären) 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. Grundmann 1999, 2001, 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. Benedick 1997, 1998, Clark/The Social Learning Group 2001, Conrad 1995, Gehring 1994, Haas et al. 1993, Kasperson/Kasperson 2000, Keohane/Levy 1996, Lipschutz/Conca 1993, Miller/Edwards 2001, Mitchell et al. 2006, Oberthür 1997, Oberthür/Ott 1999, O'Riordan/Jäger 1996, Rayner/Malone 1998, 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.[88]

3.6 Übergang zu normal science und reduzierter Forschungsförderung (ab ~2000)

Diese sechste Phase[89] ist gekennzeichnet durch einen massiven Rückgang der Fördermittel für Ozonforschung, die Fortführung der in den 1990er Jahren begonnenen kooperativen und koordinierten Forschung von aufeinander abgestimmten Laborexperimenten, Feldmessungen und Modellierungsarbeiten, die zunehmend komplexere, vorrangig ganzheitlich-systemische Betrachtung und theoretische Formulierung von ozonbezogenen Prozessen und Ozonhaushalt, und den Übergang

88 Crutzen (1996:1891f) macht in diesem Zusammenhang darauf aufmerksam, dass unter nicht allzu sehr veränderten Bedingungen „alles hätte noch schlimmer kommen können. Das stratosphärische Ozon sollte sich nun langsam über den Zeitraum eines Jahrhunderts wieder erholen. Dennoch war es sehr knapp. Hätten Joe Farman und seine Kollegen von der British Antarctic Survey nicht seit 1958/59, dem internationalen Jahr der Geophysik, all die Jahre ihre Messungen in der rauen Antarktis durchgeführt, wäre die Entdeckung des Ozonlochs wohl beträchtlich verzögert worden, und es hätte eine viel geringere Dringlichkeit bei der Durchsetzung der internationalen Abkommen zum Abbau der FCKW-Produktion geherrscht. Es hätte daher ein immenses Risiko bestanden, dass sich auch in höheren Breiten der Nordhemisphäre ein Ozonloch entwickelte. Während die Ausbildung einer Instabilität im System O_x-ClO_x eine Chloraktivierung durch heterogene Reaktionen auf festen oder unterkühlten flüssigen Partikeln voraussetzt, ist dies für anorganische Bromverbindungen nicht der Fall, da Brom aufgrund photochemischer Gasphasen-Reaktionen normalerweise vorwiegend in aktiver Form in der Atmosphäre vorkommt. Daher ist Brom für Ozon fast hundertmal gefährlicher als Chlor bezogen auf die gleiche Zahl Atome. Das führt zu dem erschreckenden Gedanken, dass wenn die chemische Industrie organische Bromverbindungen anstatt der FCKWs entwickelt hätte – oder wenn die Chlorchemie der Bromchemie ähnlicher wäre - , wir völlig unvorbereitet schon in denn siebziger Jahren einem katastrophalen Ozonloch überall und zu allen Jahreszeiten ausgesetzt gewesen wären, wahrscheinlich bevor Atmosphärenchemiker das notwendige Wissen gehabt hätten, die Probleme zu identifizieren, und die geeigneten Techniken für die schwierigen notwendigen Messungen entwickelt hätten. Da sich vor 1974 niemand Sorgen um die Konsequenzen des Chlor- und Bromeintrags in die Atmosphäre gemacht hatte, kann ich nur schließen, dass wir viel Glück gehabt haben."

89 Für ihre Darstellung kann wie gesagt nicht auf Reports zurückgegriffen werden.

zu normal science mit der Untersuchung spezieller Forschungsfragen im Rahmen der etablierten Erklärungsmodelle und Theorien.

Nachdem die für die regulative Umsetzung des Ozonregimes wesentlichen Forschungsfragen in Bezug auf die voraussichtliche weitere Entwicklung der Ozonschicht aus Sicht der Politik weitgehend geklärt waren, entfiel damit die Grundlage einer weiteren intensiven (überproportionalen) Förderung speziell der Ozonforschung. Zum einen wurde das Ozonproblem in seiner politischen Bedeutung nachrangig gegenüber dem Klimawandel und zugleich zunehmend als bloßes Teilelement der Klimaentwicklung als auch der Atmosphärenforschung verstanden und interpretiert. Zum anderen sind die (forschungs)politischen Akteure vor allem an handlungs- und umsetzungsorientierten Forschungsergebnissen und Maßnahmen interessiert und betrachteten nach Abschluss der umfangreichen Ozonforschungsprogramme die Förderung nicht nur der grundlagenorientieten Ozonforschung, sondern selbst auch der Klimaforschung allgemein als nunmehr weniger bedeutsam.[90]

Die Wichtigkeit der gut organisierten Zusammenarbeit unterschiedlicher Forschungsfelder für weitere Fortschritte in der Ozonforschung hält z.B. der Bericht der EU-Kommission über ihr Stratosphären-Forschungsprogramm 1996-2000 (mit Bezugnahme auf langfristige Messnetzwerke wie das 1991 etablierten Network for the Detection for Stratospheric Change (NSDC) und das 1989 installierte Global Atmospheric Watch (GAW) der WMO) fest: „Progress towards a better understanding of the scientific issues (of the stratospheric ozone layer) was addressed through synergistic efforts in laboratory experiments, field measurements, and modelling work.“ (EU-Commission 2001:24) Denn „a successful programme must be balanced and involve significant research capacity in the following areas: laboratory investigations of chemical and micro-physical processes; development of new instruments; co-ordinated field measurements; ground-based observation networks for long-term monitoring; deployment of research aircraft and balloons for in situ and remote-sensing instruments; analysis of satellite data from Earth observation systems; and improvement in theoretical and modelling work.“ (EU-Commission 2001:19f)

Die komplexere, differenziertere, ganzheitlichere Ausrichtung der Ozonforschung zeigt sich insbesondere in folgenden Entwicklungen und Forschungsfragen:

– Aufgrund des inzwischen vorhandenen Wissens geht es um zunehmend komplexere Modellierungen, die verschiedene Mechanismen der Ozonbildung, -zerstörung und verlagerung miteinbeziehen, mithin die Verknüpfung von Einzelphänomenen und -problemen in einer Systemforschung.
– Somit geht es um möglichst umfassende, nicht nur punktuelle Messungen aller beteiligten Komponenten, während Einzelmessungen häufig als nicht mehr besonders aussagefähig eingeordnet werden. Hierfür verfügt die Forschung inzwischen über das entsprechende Instrumentarium an Messverfahren und Messplattformen, einschließlich weiterer Satelliten und (in Entwicklung befindlicher, voraussichtlich ab 2008 (HALO) einsatzfähiger) Forschungsflugzeuge.

90 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.“ Festzuhalten ist zudem, dass in den USA die Förderung der Ozonforschung noch drastischer als in der EU oder Deutschland zurückgefahren wurde.

– Entsprechend verliert die detaillierte Prozessforschung über spezifische chemische Reaktionen an Bedeutung, da man diese inzwischen in vielen Fällen versteht, und die Untersuchung von Aerosoldynamik und Partikelgröße, -form, -verteilung tritt auf der Grundlage verfeinerter Messmethoden stärker in den Vordergrund.91

– Neben der fortgesetzten Beobachtung sich verändernder Ozonwerte und katalytisch wirksamer Substanzen in sorgfältig kalibrierten Langzeitmessungen, die zudem die Adäquanz von Modellsimulationen zu überprüfen erlauben, gewinnt mit der allmählichen Abnahme von chlorhaltigen FCKWs in der Atmosphäre die Untersuchung an derer für den katalytischen Ozonabbau relevanter Spurengase wie bromhaltiger Radikale oder durch wachsenden Luftverkehr vermehrt emittierter NOx-Gase (vgl. BMBF 2000, EU-Commission 2001, WMO 2007) an Relevanz.92

– Ebenso geraten die Wechselwirkungen von Klimaentwicklung und Ozonhaushalt mit ihren indirekt wirksamen, nur teils bekannten Feedback-Mechanismen in den Fokus der Atmosphärenforschung.93 Hierzu gehören etwa der Einfluss der sich anreichernden Treibhausgase CO2, CH4 und N2O, die Rolle von HFCKWs, die Zunahme von Wasserdampf in der Stratosphäre, Austauschprozesse zwischen Troposphäre und Stratosphäre94, tendenziell verringerte UV-Strahlung durch Treibhausgase, der abkühlende Effekt eines durch Ozonabbau bedingten negativen Strahlungsantriebs95 oder auch die bedeutsame Rolle von Schwellentemperaturen.

– Da in diesen vielfach nichtlinearen Wechselwirkungen von dynamischen und chemischen Prozessen die größten Unsicherheiten liegen und die effizientesten Transportrouten für kurzlebige Substanzen und ihre Abbauprodukte von der Erde in die Stratosphäre sich in den Tropen finden, wird der gewichtige Stellenwert der auf die Tropen fokussierenden troposphärischen (Ozon-)Forschung verständlich, zumal hier auch infolge der Industrialisierung von tropennahen Schwellenländern wie China und Indien die stärksten klimatischen Veränderungen aufgrund der anthropogen verursachten Zunahme klimawirksamer Spurengase wie insbesondere NOx-Emissionen zu erwarten sind.

– Die Berücksichtigung all dieser Mechanismen und (nichtlinearen) Wechselwirkungen in Simulationsmodellen erfordert komplexe dreidimensionale numerische CCM-Modelle, die chemische, dynamische und Strahlungsprozesse miteinander verknüpfen und die derzeit in robuster

91 So vermochten z.B. Voigt et al. (2000) erstmals NAT in PSCs nachzuweisen. Weisser et al. (2004) gelang dies auch für Chlor in PSCs.

92 „The global ozone layer recovery is expected to be linked mainly to decreasing chlorine and bromine loading, but other factors are likely to contribute." (WMO 2003:xv)

93 "The main question to be addressed in future stratospheric research is changing from 'What are the effects of halogen loading on stratospheric ozone?' to 'What is the coupling between climate change and the stratosphere?'" (EU-Commission 2001:19) Entsprechend widmet das jüngste Ozon-Assessment der WMO diesen ein eigenes Kapitel ‚Climate-Ozone Connections', in dem es festhält: „Climate change will affect the evolution of the ozone layer through changes in transport, chemical composition, and temperature. In turn, changes to the ozone layer will affect climate through radiative processes, and consequential changes in tempertature gradients will affect atmospheric dynamics. Therefore, climate change and the evolution of the ozone layer are coupled. Understanding all of the processes involved is made more complex by the fact that many of the interactions are nonlinear." (WMO 2007:5.1)

94 Deren Messung und Modellierung wird u.a. verstärkt in einem derzeit anlaufenden umfangreichen EU-Forschungsvorhaben verfolgt.

95 „The stratospheric radiative forcing due to ozone decreases since 1980 offsets about 20% of the positive forcing due to the increases in abundances of well-mixed greenhouse gases over that same time period." (WMO 2003:xvi)

Form erst entwickelt werden.96 So resümiert etwa WMO (2003:xvif): „A number of models have been run to explore the feedback between climate and the ozone layer… In this highly coupled system, attribution is difficult; studies are ongoing. Stratospheric cooling (due mainly to projected carbon dioxide increases) is predicted to enhance future ozone amounts in the upper stratosphere. However, a reliable assessment of these effects on total column ozone is limited by uncertainties in lower stratospheric response to these changes… The main uncertainties in estimating the impact of very short-lived source gases lie in the physical and dynamical processes transporting these substances into the stratosphere and in the chemistry of their degradation products. Given the complexity, three-dimensional numerical models are the preferred tools to evaluate the Ozone Depletion Potential for very short-lived source gases. Significant uncertainties exist in the treatment of dynamical and physical processes in such models."

– Außerdem sollen die Simulationsmodelle bei globaler Reichweite nach Möglichkeit zu regional differenzierten Ergebnissen führen, die regional bzw. lokal typischerweise inhomogene Randbedingungen wie etwa das variierende Maß des Spurengase und
Aerosole aus der Troposphäre entfernenden Niederschlags berücksichtigen.97

– Schließlich gibt es vermehrte Anstrengungen, spezielle (temporäre) Phänomene zu untersuchen und (mithilfe von Modellsimulationen) zu erklären, wie beispielsweise den in den letzten Jahren beobachteten späteren Zusammenbruch des antarktischen Polarwirbels oder die Ausbildung eines stärkeren nördlichen Polarwirbels in 2004/05.

Zusammenfassend sei für die jüngste Entwicklung der Ozonforschung Folgendes festgehalten: Mit Beginn der 1990er Jahre waren grundlegende Zusammenhänge des stratosphärischen Ozonhaushalts wissenschaftlich überwiegend geklärt. Sie wurden bis um 2000 in extensiven Forschungsprogrammen und -kampagnen genauer untersucht und weitgehend substanziell abgesichert.[98] Seit 2000 geht es im Sinne von normal science bei der stratosphärischen Ozonforschung um die Einrichtung und Vervollständigung globaler Datenbanken und um das Zusammentragen weiterer Mosaikbausteine. Anders als teilweise in der Klimaforschung gibt es keine wirklich bedeutsamen kontroversen Positionen und theoretische Erklärungen mehr und erscheinen spektakuläre Entdeckungen, wie diejenige des Ozonlochs, unwahrscheinlich.[99] Allerdings bleibt die genauere Klärung der zukünftigen, verstärkt von der Klimaentwicklung abhängigen Entwicklung der Ozonschicht unverändert wichtige Aufgabe der stratosphärischen Ozonforschung, die bislang durchaus noch mit kontroversen Sichtweisen verbunden ist.[100] Demgegenüber weist die troposphärische Ozonforschung noch viele grundlegendere, offene Forschungsfragen auf und gewinnt (allerdings im Rahmen der

96 Solche CCM-Modelle sind sowohl für langfristige Prognosen der Entwicklung des (stratospärischen) Ozongehalts notwendig als auch für den Design von Messungen und das Verständnis ihrer Ergebnisse wesentlich. Als Beleg für die entscheidende Rolle eines weitgehenden Stopps von FCKW-Emissionen in Bezug auf ein Ende des stratosphärischen Ozonabbaus und für die Durchführung entsprechender Messungen selbst sind sie hingegen nicht erforderlich, zumal sie auch nicht unbedingt zu gleichen Vorhersagen führen müssen.

97 So vermochten z. B. Modellrechnungen das beobachtete unterschiedliche Ausmaß des im Anschluss an die Eruption des Pinatubo stattfindenden Ozonabbaus in der nördlichen und südlichen Hemisphäre nicht zu erklären, da sie symmetrische Folgewirkungen ergaben.

98 Dies trifft für die UV-Forschung nicht zu.

99 Das heißt explizit nicht, dass sie völlig ausgeschlossen sind.

100 So bildet die zukünftige Entwicklung der Ozonschicht den Schwerpunkt der jüngsten Ozon-Assessments (IPCC/TEAP 2005, WMO 2007).

Atmosphärenforschung allgemein) – bei starker Reduzierung der gesamten Fördermittel – relativ an Bedeutung.

4 Soziale Strukturmerkmale: Forschungsaktivitäten, -programme, -institutionen, -ressourcen

In diesem Kapitel geht es im Wesentlichen darum, in historischer Perspektive (entlang der beschriebenen Entwicklungsphasen der Ozonforschung) holzschnittartig die Größenordnung und Grundmuster der sie bestimmenden Forschungsaktivitäten, -programmen, -institutionen und -ressourcen herauszuarbeiten und deren (vermutlichen) Einfluss auf Form und Inhalte der Ozonforschung zu plausibilisieren.

Für die oben beschriebene erste Phase (Entdeckung des Ozons und Bestimmung seiner Eigenschaften: ~1840 - ~1880) lässt sich cum grano salis festhalten:

Die Ozonforschung betraf die Identifikation, Konzentration, räumliche Verteilung und sodann die chemische bzw. atomare Struktur des Ozons (in der Umgebungsluft) 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 (vgl. Chubin 1976) abgrenzen lässt, insofern sich die jeweiligen Forscher nicht nur mit Ozon befassten.[101] Immerhin kam es angesichts der Vielzahl von Ozon betreffenden Forschungs- und Veröffentlichungsaktivitäten zur benannten Einrichtung einer peer review Funktionen ausübenden Kommission durch die französische Nationale Akademie der Wissenschaften.

Die für die Ozonforschung verfügbaren Ressourcen entsprachen im Grundsatz der damals üblichen universitären Ausstattung, waren jedoch in diesem Rahmen von beträchtlicher Höhe, wenn man Vielzahl der Untersuchungen und Messstationen bedenkt. Umgerechnet in heutige Lohn- und Preisäquivalente (mit ca. 100.000 € pro Wissenschaftlerjahr; inklusive anteilige Infrastruktur wie

101 So galten die Hauptinteressen Schönbeins, Professor in Basel, der Chemie des Sauerstoffs und der Oxidation, bei einer Orientierung auf qualitative Testreaktionen (vgl. Burns 1997). „Unter anderem beschrieb er als Erster die Passivität der Metalle, untersuchte die Lumineszenz des Phosphors, entdeckte das Kollodium, 1845 die Nitrozellulose und 1839 das Ozon... Er entwickelte einen Nachweis für dieses Gas mit Hilfe von Kaliumjodid-Stärkepapieren, untersuchte seine Eigenschaften und zeigte im Jahre 1845, dass das Ozon ein permanenter Bestandteil der Außenluft ist. Daraufhin veranlasste er, dass an einer Anzahl von Orten in Mitteleuropa erste laufende Bestimmungen der Ozonkonzentration der Umgebungsluft mit Hilfe dieser Kaliumjodidpapiere durchgeführt wurden, wobei die Intensität der Blaufärbung der Stärke durch das vom Ozon freigesetzte Jod als ein Maß dieser Ozonkonzentration galt.“ (Schmidt 1988:12)

Sekretariat, Materialien, Reisekosten) dürften sie wahrscheinlich eine Größenordnung von immerhin mehreren Mio. Euro jährlich erreicht haben.

Vor dem Hintergrund der damaligen Hochzeit in der Entwicklung der Chemie auf kognitiver und institutioneller Ebene war das primäre Erkenntnisinteresse wohl genuine wissenschaft-liche 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 anwendungs- und technikorientierten Verbindung von wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Interessen (vgl. Böhme et al. 1978, Weingart 1976) – die potenzielle industrielle Nutzbarkeit des Ozons.

Für die beschriebene zweite Phase (Lokalisierung von Ozon in der Stratosphäre und seine Absorption der UV-Strahlung: ~1880 - ~ 1930) ist festzuhalten:

In der Sache standen 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.[102] 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 Spezialisierung 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 (vgl. Böschen 2000).

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

102 So war Dobson, der sein Leben (als Professor für atmosphärische Physik an der Universität Oxford) seit 1920 weitestgehend der Ozonforschung widmete, nach seinem Physikstudium zunächst am Kew-Observatorium und als Meteorologielehrer an einer Flugschule beschäftigt und während des ersten Weltkriegs Direktor einer Experimentalabteilung zur Entwicklung und Erprobung von Flugnavigations- und meteorologischen Instrumenten (vgl. Dobson 1968, Schmidt 1988).

auch anwendungsorientierten, Wetterbeobachtung und -vorhersage anstrebenden Meteorologie[103], die jedoch auf der kognitiven Ebene theoretischer Erklärung noch kaum Bedeutung besaßen.

In der dritten Phase (Theorie und Quantifizierung der atmosphärischen Ozonverteilung: ~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, O_2, O_3, 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), 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).

Auf sozialer Ebene gewann die im Wesentlichen stratosphärische Ozonforschung weiteres Gewicht. Diese Laborexperimente, Boden- und Ballonmessungen und erste Modellrech-nungen 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 IOC 1948 oder die Notwendigkeit standardisierter Routinen der Datenerhebung und Bericht-erstattung). 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. Die verfügbaren Forschungsressourcen nahmen insbesondere im Gefolge des Internationalen Geophysikalischen Jahres (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.[104]

103 So hingen – nach Erfindung des für den unmittelbaren Datenaustausch damals zwingend notwendigen Telegraphen – die ersten aktuellen Wetterkarten, die anhand der Meldungen von 22 Wetterstationen gekennzeichnet wurden, 1851 auf der Weltausstellung in London (Malberg 1994:169).

104 Insofern die (atmosphärische) Ozonforschung, wie in Kapitel 8 nochmals ausgeführt wird, im Wesentlichen die Physik und Chemie des Ozons in der Atmosphäre untersucht, handelt es sich streng genommen um angewandte Forschung,

Für die vierte Phase (Katalytischer Ozonabbau: ~1965 - ~ 1985) sind folgende Merkmale kennzeichnend:

Sachlich stand der katalytisch induzierte Ozonabbau (und dessen Auswirkungen) im Vordergrund, wobei Möglichkeit und Nachweis seiner Verursachung durch menschliche Aktivitäten/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. 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 (ferner) Zukunft zu erwarten waren.[105] 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 chlorinduziertem 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) benötigten beträchtliche Ressourcen und waren angesichts der konfligierenden vested interests nicht verfügbar, sodass sich zumindest kurzfristig keine dominante Erklärung herausbilden konnte. Wiederum spielten 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).[106]

jedoch nicht um genuin problemorientierte Forschung, weil nicht ein bestimmtes, sozial und nicht disziplinär definiertes Problem im Zentrum des Erkenntnisinteresses steht. „Problem oriented research differs from applied research. The latter is oriented towards the specification and application of available scientific knowledge (analytical models, conceptual schemes, techniques, instruments) for relatively clearly specified purposes. In contrast problem oriented research must, in principle, deal with uncertainties related to prognosis, complexity and contingency in order to legitimize uncertain decisions which have no certain foundations, but typically cannot wait until basic questions of a scientific field have been solved." (Conrad 2002:57)

105 Bezeichnend war in diesem Zusammenhang auch die erwähnte, seitens der NASA veranlasste, ihr hinterher peinliche systematische Ausblendung stark abweichender Ozonwerte vor der Entdeckung des antarktischen Ozonlochs (vgl. Lambright 2005), die allerdings völlig üblichen Verfahren der Plausibilitätsprüfung großer Datenmengen mittels Algorithmen entsprach.

106 „Despite these known limitations of 1-D models, and despite vigorous pursuit of 2-D models beginning as early as 1973, 1-D models remained the principal tools for stratospheric calculations through the mid-1980s. Until then, the additional computational burden of even a 2-D model required using highly simplified chemistry, a disadvantage that persisted for years because rapidly increasing chemical complexity was a moving target for 2-D modelers. Most modelers judged it more important to include a full, current set of chemical processes than to represent two-dimensional movement… Realistic calculations of projected ozone depletion required considering all these human perturbations to the stratosphere together, but computational and modelling limits restricted early models to examining one change at

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 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[107], die ihr zur Verfügung stehenden beträchtlichen Ressourcen in Verbindung mit ihrem administrativen und politischen Rückhalt[108] 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).[109] 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 Ozon-forschung[110], 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.[111]

---

a time. The first studies to consider two changes together appeared in 1978… As these multiple-perturbation studies increasingly revealed the importance of changes in the lower stratosphere, and consequently of adequate representation of atmospheric transport, 1-D models appeared to have reached the limits of their usefulness… The first time-dependent 2-D model run with multiple perturbations, completed in 1985 and widely publicized at international meeting in 1986, underscored the emerging result that even small CFC growth could give substantial ozone loss at mid to high latitudes, since the lower-stratosphere increases that offset upper-stratosphere losses in 1-D models were concentrated near the equator… With one exception, no attempt was made through 1985 to consider heterogeneous reactions in stratospheric models… The 1985 [WMO] assessment merely noted heterogeneous reactions as being of potential, but unproven, importance." (Parson 2003:70ff)

107 „NASA had legislative authority. NASA obtained lead agency status by virtue of legislation passed in 1975 and 1977… NASA had the legitimacy to pursue research *and* to make assessments of what this research meant for policy." (Lambright 2005:47)

108 „NASA had a legislative mandate for a program and a steady budget for ozone depletion research. It controlled approximately 70 percent of the federal government's ozone-related research dollars." (Lambright 2005:11)

109 Die – auf der Basis der gemeinsamen Orientierung und Zusammenarbeit von Watson und Tolba – von der NASA zusammen mit UNEP 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).

110 Wie bereits gesagt, sind es 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.

111 Bei den für die verschiedenen Phasen abgeschätzten Forschungsressourcen handelt es sich um grobe Schätzungen der jeweiligen Größenordnung, da ihre genauere Ermittlung aufwändige Recherchen erfordern würde und ihre Größe wesentlich abhängt vom Ausmaß der anteiligen Zuordnung bestimmter Kostenpositionen. Die meisten mit Ozonforschung befassten Wissenschaftler tun dies nur mit einem (über die Zeit und projektbezogen variierenden) Teil ihrer Arbeitszeit; teure Satelliten und Forschungsflugzeuge erheben meist nur zu einem Bruchteil den Ozonhaushalt betreffende Daten; das Personal ozonrelevante Messdaten erhebender Messstationen und ähnlicher (meteorologischer) Einrichtungen verwendet üblicherweise nur einen geringen Teil seiner Arbeitszeit dafür und betreibt kaum genuine Forschung; extensive zeitaufwändige Review-Prozesse stellen im strengen Sinne keine eigentliche (Ozon)Forschung dar. So basieren die Abschätzungen auf diesbezüglichen Nachfragen bei einem Interviewpartner, auf den Kosten des deutschen Ozonforschungsprogramms (47 Mio. € verteilt über 10 Jahre), auf Wissen über die Zahl der Institutionen

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-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).[112]

In der fünften Phase (Ozonloch und umfangreiche Ozonforschungsprogramme: ~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 überwiegend 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 WMO. 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-Panels) wurden durch politisch forcierte Forschungsprogramme gefördert.[113] Dabei bildete sich auch eine Vielzahl von mehr oder minder mit Ozonforschung und Datenerhebung befassten nationalen, europäischen und internationalen Forschungsgruppen und Organisationen heraus.[114]

mit vorrangig grundfinanzierter Ozonforschung in Deutschland, auf den Angaben über die (jährlichen) Kosten von (Ozon-)Forschungsprogrammen und Satellitenentwicklungen der NASA in Lambright (2005), auf der Annahme mittlerer (heutiger) Gesamtjahreskosten eines Wissenschaftlers von 100.000 € (inklusive anteilige Infrastruktur wie Sekretariat, Materialien, Reisekosten), auf Schätzungen vermutlicher Manpower-Werte für frühere Phasen, auf der Annahme, dass Ozonforscher im Mittel über die Jahre 25 bis 50 % ihrer Zeit hierfür verwenden, auf der Annahme, dass die Monitoring-Programme bei 100 bis 200 Messstationen dafür jeweils 5% der Jahresarbeitszeit einer Person benötigen, auf Hochrechnungen deutscher Werte auf die EU (Faktor ca. 3) und die USA (variierender Faktor 5 bis 10), auf dem Wissen um das ungefähre Gleichziehen der EU mit den USA in der Ozonforschung seit ca. 2000 und auf die trotz einiger Forschungsaktivitäten im Vergleich eher geringen andernorts noch aufgewandten Fördermittel für die Ozonforschung in Skandinavien, Russland, Japan, Australien und Neuseeland.

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

113 Diese kamen gerade auch der NASA zupass, insofern sie etwa nach der Challenger-Katastrophe froh sein konnte, sich verstärkt in der (Förderung der) Ozonforschung engagieren zu können.

114 Allein der Bericht der EU-Commission (2001) führt als Acronyme eine Vielzahl von vor allem EU-geförderten Programmen, Kampagnen, Projekten, Modellen und Instrumenten auf.

Die für die Ozonforschung verfügbaren Ressourcen erreichten in dieser fünften Phase mit jährlich wohl mindestens 100 Mio. € ihren Höhepunkt.[115]

Bei aller Verflechtung von wissenschaftlichen, technischen, wirtschaftlichen und politischen Anliegen herrschte ab Ende der 1980er Jahre nach der Herausbildung einer dominanten, wissenschaftsintern durchgängig und -extern überwiegend akzeptierten Erklärung des Ozonproblems eine Kombination von grundlagenorientierter Ozonforschung und extensiver Datenerhebung in Kampagnen und Monitoring-Programmen vor.[116] 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 (wissenschaftsexterne) Einflussnahme auf die Ozonforschung betraf 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, 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 zusammenfassenden Programmberichte waren und sind zwar auf kompakte Verständlichkeit hin formuliert (Ergebnis- statt Theoriepräsentation), aber kaum geschönt.

Für die laufende sechste Phase (Übergang zu normal science und reduzierter Forschungsförderung: ab ~2000) lässt sich zusammenfassend festhalten:

Die Forschungsaktivitäten betreffen – wie beschrieben – im Wesentlichen die Fortführung laufender Monitoring-Programme[117], die Erhebung und Auswertung von der Klärung spezifischer Phänomene und Forschungsfragen dienenden Daten mithilfe verfügbarer (zusätzlicher) Messplattformen und -instrumente, die Durchführung aufeinander abgestimmter Laborexperimente, Feldmessungen und Modellierungsarbeiten in gemeinsamen Forschungsprojekten[118], 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[119], und die Verstärkung der troposphäri-

115 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).

116 Analoges gilt für die UV-Forschung.

117 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 in den jüngsten Ozon-Assessments für Ozon (WMO 2007) bzw. für ozonzerstörende Halogenkarbonate (IPCC/TEAP 2005) bewusst dargestellt wird.

118 Exemplarisch sei dies an der Untersuchung der für den Ozonabbau entscheidenden heterogenen Reaktionen an PSC-Teilchen etwas genauer verdeutlicht: „Die Berücksichtigung heterogener chemischer Reaktionen in atmosphärischen Modellen erfordert Kenntnisse über die Häufigkeitsverteilung der Partikel sowie der Reaktionsrate an der Oberfläche bzw. im Innern der Partikel. Die Verifizierung dieses Konzeptes ist deshalb eine gemeinsame Aufgabe von Mikrophysik, Laboruntersuchungen und Feldbeobachtungen. In kinetischen Gleichungen zur Beschreibung der Umsätze von Mehrphasenprozessen wird üblicherweise ein sog. reaktiver Aufnahme-koeffizient definiert. Dieser ist die makroskopische Zusammenfassung einer Sequenz von mikroskopischen Ereignissen wie die Gasphasendiffusion, die Oberflächenreaktivität, dem Phasengrenzflächendurchtritt, die Flüssigphasendiffusion und die Flüssigphasenreaktivität. Aufnahmekoeffizienten müssen grundsätzlich in Laborexperimenten bestimmt werden; modellmäßige Vorstellungen oder gar physikalisch-theoretische Deutungen stecken noch in den Ansätzen. Die bislang vorliegenden Untersuchungen haben gezeigt, dass Aufnahmekoeffizienten reaktionsspezifisch sind und von der Zusammensetzung der Partikel und deren Phase abhängen. Ein besonderer Faktor ist die Temperatur.“ (BMBF 2000:73)

119 Entsprechend lautet das Plädoyer der am stratosphärischen EU-Forschungsprogramm maßgeblich beteiligten Wissenschaftler (EU-Commission 2001:27): „Atmospheric models and related chemical measurements play a core role in

schen 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.[120] 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 Atmosphärenforschung[121] 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 reputationsgesteuerten[122], aber faktisch auch an Mertons Normen wissenschaftlicher Forschung[123] orientierten, gegenüber direkten externen Steuerungsversuchen resistenten (finalisierten) Forschung auf, insofern ihr Erkenntnisinteresse dem grundlegenden und zugleich detailge-

the scientific analysis underpinning any emission control strategy. All scales, from hemispheric to local, need to be covered. Model validation and comparison with measured data and different model simulations under well-defined boundary conditions are needed. Emphasis should move away from episodic situations to full coverage of several years. To account for inter-continental interaction, hemispheric modelling of relevant pollutants and scenarios are required, here emissions of aircraft are very important. To fully reach these objectives, Europe should:

- ensure long-term continuity of observation and strongly enhance the validation and exploitation of satellite data that will become available, such as the ESA's, ENVISAT and other multi-national space missions;
- provide sufficient computer power for sophisticated coupled climate/chemistry simulations; and
- invest in internationally competitive research infrastructure, such as high-flying and/or long-range research aircraft with large instrument load capacity."

120 In Deutschland sind hier im Wesentlichen universitäre und Max-Planck-Institute in Berlin, Bremen, Frankfurt, Hamburg, Heidelberg, Mainz und Potsdam, die entsprechenden Institute in Oberpfaffenhofen und den Forschungszentren Jülich und Karlsruhe sowie das Alfred-Wegener-Institut (AWI) in Bremerhaven zu nennen.

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

122 vgl. Luhmann 1968, 1990

123 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) Van den Daele/Krohn (1975) leiten die trotz aller begründeten (soziologischen) Kritik an ihrer Geltung bestehende begrenzte Wirksamkeit dieser Normen aus den Imperativen eines technisch-experimentellen Wahrheitsbegriffs ab.

nauen Verständnis des Ozonhaushalts und den Aussichten einer Regeneration der Ozonschicht gilt.[124]

Vor dem Resümee der sozialen Strukturmerkmale der Ozonforschung und der Erörterung ihres Einflusses auf Form und Inhalte der Ozonforschung verdeutlicht der folgende Kommentar von Schiff (1999) prägnant deren kognitive Entwicklung und motivationale Beweggründe.

„*When Do We Know Enough about Atmospheric Chemistry?*

The simple Chapman mechanism ... was too successful in explaining the main features of the ozone layer. Not only did it account for the presence of a small steady-state concentration of ozone in the Earth's atmosphere, but also its location and distribution in the stratosphere. Since the solar intensity increases with altitude while the concentration of molecular oxygen decreases, there will be an altitude at which the ozone concentration reaches its maximum. Nature, knowing the rate constants for each of the reactions, knew that the optimal place to locate the ozone factory was in the stratosphere. In fact, the mechanism can account for the very existence of the stratosphere. The energy abstracted from the solar radiation to dissociate molecular oxygen and ozone in the first and third reactions is deposited locally by the second and fourth reaction, resulting in the temperature inversion that defines the stratosphere.

So successful was this simple four-step mechanism that the stratosphere remained relatively unpopulated by atmospheric scientists from 1930, when Chapman first proposed his mechanism, until the 1970s. Everything was known about the stratosphere!! The higher territories of the mesosphere and ionosphere were relatively highly populated, mostly by physicists, who were attracted to the emissions from the electronically and vibrationally excited molecules and ions that occurred there. The lower territory, the troposphere, was populated by chemists, who, under the pioneering leadership of A. J. Haagen-Smit, were attracted by the photochemistry involved in urban pollution areas such as Los Angeles.

A handful of chemists remained in their laboratories measuring the rate constants of the Chapman reactions. As these rate constants became well established, it became evident that the simple four-step mechanism was quantitatively inadequate. It predicted ozone concentrations roughly twice what was observed to be present. Obviously other reactions must be destroying ozone. Since the reactions of ozone with the major and minor gases in the atmosphere were too slow to account for the discrepancy, the missing reactions had to be with species present in minute, trace quantities, which, therefore, required them to initiate catalytic chain reactions. The realization that the concentration of stratospheric ozone is controlled by gases that are present in amounts even smaller than ozone itself is the basis of the concern that human activity could alter its steady-state concentration.

The first of these activities that could affect the steady-state ozone layer was the operation of a fleet of supersonic aircraft, which was designed to fly in the stratosphere. The exhausts from these aircraft would inject water vapor and oxides of nitrogen, which could form HO, HO_2, and NO and NO_2 catalytic chain carriers. The next was the emission of chlorofluorocarbons from aerosol spray cans and refrigerants, which could form Cl and ClO chain carriers. This was considered to be an

124 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)

even more insidious threat to the ozone layer because of the long lifetime of the halocarbons in the atmosphere.

These concerns resulted in a mass immigration of scientists into the stratosphere, including chemists, physicists, engineers, meteorologists, and computer modelers. Laboratory scientists developed new and powerful techniques for studying the mechanisms and rate constants of the reactions, which were then used by the modelers to describe the existing atmosphere as well as to predict the future according to various anthropogenic emission scenarios. Another group of scientists developed sophisticated techniques and instruments to measure the composition and distribution of key species in the atmosphere. These instruments were either used at ground level or carried aboard high-flying aircraft or stratospheric balloons. The measurements were then compared with the computer models. A highly productive community flourished where results of each group were used to suggest improvements in the others. By the end of the 1980s the four Chapman reactions involving three chemical species had grown to more than 1000 reactions involving hundreds of reactive species. By the mid-1980s, aside from a few minor discrepancies, models and measurements agreed pretty well. Virtually everything was known about the stratosphere!!! Many of us then migrated out of the stratosphere to more rewarding employment in the troposphere, where acid deposition and other tropospheric pollution problems were gaining interest.

And then in 1985 the Antarctic ozone hole was discovered which caught the entire stratospheric community by surprise. Nothing in the existing models could explain these observations. For a short period of time there were almost as many explanations as there were scientists. But to the great credit of the community, it took a remarkably short time for the laboratory chemists to find the correct explanation and for observations to confirm it. The explanation was that of surface reactions…

Those of us who have moved back into the troposphere are quite aware of the importance of heterogeneous reactions. The oxidation of SO_2 occurs largely in cloud droplets and involves free radicals and ions. The importance of reactions on the surfaces of aerosol particles in urban pollution is only beginning to be understood. Many of the major production and loss processes of atmosphere species occur at the surface of soils and vegetation and involve biological processes. Biological scientists are joining the atmospheric science community in increasing numbers. There appears to be no danger of overpopulation in this community. We can never be complacent that we know everything about any region of the atmosphere. The only surprise would be if there were no other surprises. This is what makes the Earth's atmosphere such a fascinating place to live and work in."

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 (vgl. Kapitel 7),
– 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 Forschungsressourcen125,
– 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.

Was nun Art und Reichweite der Wirkungen der skizzierten sozialen Strukturmerkmale auf die Ozonforschung anbelangt, so kann zunächst einmal Folgendes festgehalten werden:

1. Ohne die Finanzierung und Entwicklung entsprechender Messplattformen und Messinstrumente wären 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[126] möglich gewe-

125 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.

126 „This cycle is now well recognized as the primary catalytic process responsible for about 75% of the ozone removal in the ozone hole.“ (Solomon 1999:286)

sen.

2. 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.

3. Ohne das kooperative Zusammenwirken vieler Forschungs- und Messinstitutionen, unterschiedlicher Analyseformen (theoretische Erklärung, Laborexperimente[127], bodengestützte, satellitengestützte und In-situ-Feldmessungen, Modellierung) und verschiedener Disziplinen (im Wesentlichen Teilgebiete von Physik, Chemie, Mathematik und Meteorologie) wären insbesondere die in der letzten Dekade(n) entwickelten, komplexeren, systemisch angelegten Erklärungen des Ozonhaushalts nicht möglich gewesen.[128]

4. Insofern reputations- und karriereförderndе Forschungsleistungen und -ergebnisse auch weiterhin vorrangig individuellen Personen zugeschrieben werden, spielte dabei auch die Bereitschaft individueller Ozonforscher zur über die Forschungsprogramme mit erzwungenen, im Nachhinein häufig als gewinnbringend erfahrenen Kooperation mit offenem Informations- und Datenaustausch unter Hintanstellung der im Wissenschaftsbetrieb typischen Konkurrenz eine maßgebliche Rolle.

5. Eine bewusste und gezielte, bestimmte Forschungsergebnisse präferierende Einflussnahme auf die Ozonforschung seitens wissenschaftsexterner Akteure lässt sich vor allem für die vierte Phase (1965-1985) beobachten, die einerseits von der Erkenntnis möglicher durch menschliche Projekte verursachter Umweltprobleme und von möglichen (wirtschaftlichen) Kosten eventueller Restriktionen und anderseits von wissenschaftlichen Unsicherheiten und Kontroversen geprägt war. Solche Einflussversuche waren grundsätzlich zu erwarten. Sie betrafen dabei primär wissenschaftsexterne Arenen, in denen es um Regulierungsmaßnahmen, Verbotszeitpunkte, FCKW-Substitute oder Finanzierungsfragen ging, die – dem in westlichen Industriegesellschaften vorherrschenden Begründungsmodus wissenschaftlicher Rationalität entsprechend (vgl. Daele 1996) – mit (pseudo-)wissenschaftlichen Argumenten untermauert wurden, und weniger um Einflussnahme auf die konkrete Durchführung von Forschungsvorhaben.

6. In der Wissenschaft sind unterschiedliche Erklärungsvorschläge, wie sie etwa für die Entstehung des Ozonlochs vorgetragen wurden, durchaus erwünscht und legitim, selbst falls sie aus nichtwissenschaftlichen Interessen und Motiven herrühren, solange sie sich der kritischen Prüfung durch die scientific community stellen und durch Nachweis entsprechender empirischer oder theoretischer Unstimmigkeiten zurückgewiesen werden können (vgl. Solomon 1988, 1999).

---

127 „Am stratosphärischen Ozonabbau ist eine Vielzahl von chemischen Prozessen beteiligt. Die vielfach komplexen Zusammenhänge und Mechanismen des Ozonabbaus lassen sich praktisch nicht allein aus Feldmessungen ableiten, da sie von der atmosphärischen Dynamik überlagert werden. Zur genaueren Untersuchung der chemischen Prozesse ist es daher notwendig, die Komplexität der atmosphärischen Bedingungen gezielt so zu vereinfachen, dass einzelne Prozesse quantifizierbar sind. Die Resultate dieser Untersuchungen, die in geeigneter Weise im Labor durchgeführt werden, lassen sich dann mithilfe von Modellen im Hinblick auf die zuverlässige Simulation von Feldmessungen sowie für Prognosen künftiger Entwicklungen des stratosphärischen Ozonbudgets nutzen.“ (BMBF 2000:75)

128 „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)

7. Die Möglichkeit alternativer Lösungen des Ozonproblems zu der Einstellung der FCKW-Produktion wurde entweder (Injektion von Ozon in die Stratosphäre, direkte Beeinflussung der katalytischen Zyklen des Ozonabbaus in der Stratosphäre) als nicht praktikabel[129] ausgeschieden oder als politisch nachrangig (Schutzmaßnahmen gegen UV-B Strahlung) nur eingeschränkt weiter verfolgt.
8. Für die politische und praktische Umsetzung von den Schutz der Ozonschicht und das Auslaufen der FCKW-Produktion betreffenden Maßnahmen insbesondere im Rahmen des internationalen Ozonregimes waren kontinuierliche Diskurse mit dem Austausch von Informationen und Argumenten in Arbeitsgruppen, Monitoring-Programme und Assessments zentral, wodurch eine regelmäßige, institutionalisierte Kommunikation zwischen wissenschaftlichen, wirtschaftlichen und politischen Akteuren mit der entscheidungsrelevanten Vermittlung und Rezeption wissenschaftlichen Wissens (und Nichtwissens) zustande kam, sodass sich in diesem Fall durchaus ein (vor allem über scientific Assessments laufende) signifikanter, vergleichsweise direkter Einfluss wissenschaftlicher Erkenntnisse auf Umwelt- und Technologiepolitik und die damit zusammenhängende Umstellung industrieller Produktionsverfahren beobachten lässt.

Während die Ozonforschung in ihrem Umfang, ihren Themen und Schwerpunkten, in ihren Lösungsvorschlägen und Anbindungen (an andere Forschungsgebiete), und auch in ihrer sozialen Struktur durchaus maßgeblich, aber nicht ausschließlich von außerhalb des Wissenschaftssystems liegenden sozialen Determinanten bestimmt wurde, bleibt zu klären, ob sie auch in Struktur und Inhalt ihrer Methoden, Theorien und Ergebnisse durch externe Zweckorientierung beeinflusst wurde.[130]

In ihrer Behandlung der Agrikulturchemie als finalisierte Wissenschaft weisen Krohn/Schäfer (1978) darauf hin, dass sich Finalität nicht auf die Form der Gesetzmäßigkeit, sondern auf die Möglichkeit der wissenschaftlichen Konzeptualisierung sozialer Ziele beziehe, und dass finalisierte Disziplinen im Spannungsfeld zwischen einem interdisziplinären Eklektizismus, der nur aus Gründen der sozialen Dringlichkeit betrieben werde, und einem allein durch theoretische Fragestellungen erzeugten wissenschaftlichen Interesse entstünden. Historisch gesehen sei die Agrikulturchemie ein sehr frühes Bespiel für eine erfolgreiche zweckorientierte Wissenschaft, die nicht, wie die zweckorientierten Wissenschaften früherer Zeit, nur Modelle und Analogien für ihren Phänomenbereich formuliere, sondern eine Theorie, die deduktiv, umfassend und heuristisch sei und die Funktion eines Paradigmas für die Grundlagenanwendung zu erfüllen vermochte. Sie stelle ein neues Erklärungsmodell auf, das zwar mit den Grundgesetzen der Chemie und ihren Ordnungstheorien kompatibel, aber nicht in einem trivialen Sinne aus ihnen ableitbar sei. Es habe vielmehr der Entwicklung von Konzepten und Forschungsmethoden bedurft, die in der Chemie nicht gebraucht wurden. Die Theorie der Kreislaufprozesse sei ein Beispiel dafür. Daher sei es treffend, diese Theorie eine „Anwendungsgrundlagentheorie“ zu nennen.

129 „Making enough ozone to artificially replace even a small fraction of the global burden would be still be an extremely expensive proposition today. Alternative schemes involving interference with chlorine chemistry have also been shown to be impractical (see, e.g., Viggiano et al., 1995). Hence the reduction of global emissions and the resulting gradual removal of atmospheric chlorine is the only known practical approach to future recovery of the ozone layer.” (Solomon 1999:280)

130 vgl. dazu ausführlich Böhme et al. 1978, Daele/Weingart 1975, Daele/Krohn 1975, Daele et al. 1979, Krohn/Daele 1998, Krohn/Küppers 1989, Weingart 1976, Weingart 2001

Überträgt man diese Überlegungen auf die Ozonforschung, so sind zum einen deutliche Parallelen erkennbar, insofern sie als problemorientierte Forschung per definitionem zweckorientiert ist und sich gleichfalls in einem Spannungsfeld von interdisziplinärem Eklektizismus und theorieorientierten Fragestellungen bewegt. Auch sind konkrete Erklärungsmodelle des Ozonproblems in ihrer Struktur und ihren Variablen nachweislich vom Zusammenhang von FCKW-Emissionen, Chlorfreisetzung und Ozonabbau geprägt.

Ein darüber hinausgehender Einfluss dieser Problem- und Zweckorientierung auf die substanzielle Struktur von Theoriebildung und infolgedessen auf die Inhalte von Forschungsergebnissen erscheint mir hingegen nicht erkennbar. So sind zentrale Konzepte wie katalytische Abbauzyklen, heterogene Reaktionen, polare stratosphärische Wolken oder die Wechselwirkung zwischen Ozonabbau und Temperaturabnahme in der Stratosphäre zwar zweifellos im Rahmen einer auf das Ozonproblem orientierten Forschung entstanden, aber sie sind in einer allgemeinen Theorie der stratosphärischen Ozonchemie und -dynamik, die u.a. chlorinduzierten Ozonabbau zu berücksichtigen hat, wohl in jedem Fall notwendig und wesentlich. Bei einer rein grundlagentheoretischen Orientierung der Ozonforschung würden Messverfahren und Laborexperimente aufgrund dann teils anderer konkreter Untersuchungsobjekte voraussichtlich teilweise ein anderes Design aufweisen, dürften aber bei denselben Untersuchungsobjekten und -fragen sehr wohl gleichartige Methoden anwenden. Analog sind die problembezogen für die Berechnung des katalytischen Ozonabbaus entwickelten Simulationsmodelle für die hierbei auftretenden Phänomene und Prozesse besonders spezifiziert und detailliert; auf ebendiesen Ozonabbau angewandte, jedoch zunächst unabhängig von ihm entwickelte allgemeine atmosphärische Modelle wären aber vermutlich ähnlich strukturiert. Im Ergebnis ist daher auch ohne vorrangigen Bezug zum Ozonproblem kein anderes Paradigma einer sich in den letzten Jahren zunehmend entwickelnden allgemeinen Theorie der stratosphärischen Ozonchemie und -dynamik anzunehmen. Letztlich lässt sich die Frage, ob es ohne die beschriebenen Kontexte und Zweckorientierung der Ozonforschung jenseits ihrer bloßen Nichtentwicklung bzw. anderweitigen Spezifizierung zu zumindest partiell auch in ihrem Kern anderen Theorien, Methoden oder Ergebnissen der Ozonforschung gekommen wäre, nicht eindeutig beantworten. Allerdings sprechen nur wenige Indizien dafür.

5 Ergebnisse der (problemorientierten) Ozonforschung

Wenn nachfolgend – bei weitgehender Vermeidung von Wiederholungen aus Kapitel 3 – selektiv vergleichsweise konkrete Ergebnisse der atmosphärischen Ozonforschung aufgelistet werden, die im Wesentlichen WMO (1998, 2003), BMBF (2000), EU-Commission (2001) und Solomon (1999) entnommen sind, dann dienen sie als exemplarisches Material, um die in Kapitel 6 aufgeführten, die (stratosphärische) Ozonforschung bestimmenden Theorien und Modelle mit substanziierten Verweisen unterlegen zu können. Abgesehen von nicht beanspruchter Repräsentativität der aufgelisteten Forschungsergebnisse stellt sich die Frage, nach welchen Kriterien sie ausgewählt und ge-

ordnet werden können. Hier bieten sich etwa folgende, eher phänomenologische oder eher konzeptionelle Ordnungsraster[131] an:

- (in den Reports vorherrschende) Einteilung nach geographischen und thematischen (Forschungs-)Bereichen: Stratosphäre allgemein, Antarktis, Arktis, mittlere Breiten, Tropen, Troposphäre, chemische Familien von Spurengasen (Halogene, C-, N-Verbindungen), homogene und heterogene Chemie in der Stratosphäre, Ozon und Klimawandel, UV-Strahlung;
- Analyseebenen: erklärende Modelle und Theorien, Feldmessungen und deren Validierung, Laboruntersuchungen, Modellsimulationen, außerdem Verwendung von Theorien/Erkenntnissen der Atmosphärenforschung (z.B. über Atmosphärendynamik, Aerosole, Spurengase), sowie als problembezogene Randbedingungen Wissen über FCKW und Substitute (Produktion, Emissionsverhalten, Diffusion in Stratosphäre) und über UV-Strahlung und deren Effekte;
- theoriebezogene Erklärungsmuster: Chemie, Strömungsphysik, Mikrophysik, Photophysik/-chemie, Thermodynamik, Interaktionsdynamik/komplexe Modelle, sonstige genutzte Theorien;
- konkrete Phänomenbereiche: z.B. polare Vortex, troposphärische Turbulenzen und Transporte, PSC-Teilchen, Sedimentation, Denitrifizierung, Denoxifizierung, Chloraktivierung, Gebirgswellen, nordatlantische Oszillation, quasi-zweijährige Schwingung, solarer Zyklus;
- Typus der Forschungsergebnisse: heute gesicherte Erkenntnisse/Wissen, offene (interessante) Fragen, Beschreibung und Erklärung (spezifischer) primär gesellschaftlich bestimmter Phänomene und Fragen, Unsicherheiten, Evaluationen, Kontroversen, erklärende Modelle und Theorien.

Die nachfolgende Darstellung orientiert sich aus pragmatischen Gründen im Wesentlichen an den beiden ersten Ordnungskriterien, weil sie infolge des Charakters der Ozonforschung vor allem problemorientierte Forschungsergebnisse präsentiert, die sich per definitionem nicht umstandslos einem bestimmten theoriebezogenen Erklärungsmuster zuordnen lassen, auch wenn das dritte Ordnungsraster mit Blick auf den Zweck dieser Studie vordergründig nahe liegen mag. Da überwiegend eher allgemeinere, für den Leser leichter nachvollziehbare Ergebnisse[132] vorgestellt werden, ist das vierte Ordnungsraster wenig geeignet. Da in dieser Studie vorrangig disziplinäre Verankerungen empirisch eher gut belegter theoretischer Erklärungen interessieren, werden vor allem gesicherte Erkenntnisse aufgelistet, sodass fast nur ein Typus von Forschungsergebnissen angesprochen wird, was die Anwendung des fünften Ordnungsrasters wenig ergiebig macht.[133]

131 Diese Ordnungskriterien werden deshalb explizit vorgestellt, weil auf sie in den folgenden Kapiteln noch situativ zurückgegriffen wird.

132 Zu illustrativen Zwecken werden auch einige speziellere Forschungsergebnisse beschrieben.

133 Unterschiedliche Typen von Wissen werden in den folgenden Kapiteln jedoch noch thematisiert.

Tab. 5.1: Chemische Schlüsselreaktionen und katalytische Zyklen, Ozon betreffend
Quelle: Solomon 1999:278

Chemical Process	*Reaction Number*
Chapman Chemistry[a]	
$O_2 + h\nu \rightarrow 2O$	R1
$O + O_2 + M \rightarrow O_3 + M$	R2
$O_3 + h\nu \rightarrow O_2 + O(^1D)$	R3
$O(^1D) + M \rightarrow O + M$	R4
$O_3 + h\nu \rightarrow O_2 + O$	R5
$O + O + M \rightarrow O_2 + M$	R6
$O + O_3 \rightarrow 2O_2$	R7
Illustrative Odd Hydrogen Catalytic Cycles[b]	
$O + OH \rightarrow O_2 + H$	R8
$H + O_2 + M \rightarrow HO_2 + M$	R9
$O + HO_2 \rightarrow O_2 + OH$	R10
Net Cycle 1: $O + O + M \rightarrow O_2 + M$	R6
$OH + O_3 \rightarrow HO_2 + O_2$	R11
$HO_2 + O_3 \rightarrow OH + 2O_2$	R12
Net Cycle 2: $2\ O_3 \rightarrow 3O_2$	R13
Illustrative Odd Nitrogen Catalytic Cycle[c]	
$NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2$	R14
$O + NO_2 \rightarrow NO + O_2$	R15
Net Cycle 3: $O + O_3 \rightarrow O_2$	R7
Illustrative Odd Chlorine Catalytic Cycles[d]	
$Cl + O_3 \rightarrow ClO + O_2$	R16
$ClO + O \rightarrow Cl + O_2$	R17
Net Cycle 4: $O + O_3 \rightarrow O_2$	R7
$Cl + O_3 \rightarrow ClO + O_2$	R16
$Cl + O_3 \rightarrow ClO + O_2$	R16
$ClO + ClO + M \rightarrow Cl_2O_2 + M$	R18
$Cl_2O_2 + h\nu \rightarrow Cl + ClO_2$	R19
$ClO_2 + M \rightarrow Cl + O_2 + M$	R20
Net Cycle 5: $2\ O_3 \rightarrow 3O_2$	R13
Illustrative Cl-Br Catalytic Cycle[e]	
$Cl + O_3 \rightarrow ClO + O_2$	R16
$Br + O_3 \rightarrow BrO + O_2$	R21
$BrO + ClO \rightarrow Br + ClO_2$	R22
$ClO_2 + M \rightarrow Cl + O_2 + M$	R20
Net Cycle 6: $2\ O_3 \rightarrow 3O_2$	R13
Some Important Coupling and Reservoir Reactions	
$ClO + NO \rightarrow Cl + NO_2$	R23
$Cl + CH_4 \rightarrow HCl + CH_3$	R24
$HO_2 + ClO \rightarrow HOCl + O_2$	R25
$ClO + NO_2 + M \rightarrow ClONO_2 + M$	R26
$OH + NO_2 + M \rightarrow HNO_3 + M$	R27
Key Heterogeneous Reactions	
$HCl + ClONO_2 \rightarrow HNO_3 + Cl_2$	R28
$N_2O_5 + H_2O \rightarrow 2HNO_3$	R29
$ClONO_2 + H_2O \rightarrow HNO_3 + HOCl$	R30
$HCl + HOCl \rightarrow H_2O + Cl_2$	R31
$BrONO_2 + H_2O \rightarrow HNO_3 + HOBr$	R32
$HCl + BrONO_2 \rightarrow HNO_3 + BrCl$	R33
$HCl + HOBr \rightarrow H_2O + BrCl$	R34

[a] *Chapman* [1930].
[b] *Bates and Nicolet* [1950]; *Hampson* [1964].
[c] *Crutzen* [1970]; *Johnston* [1971].
[d] *Stolarski and Cicerone* [1974]; *Molina and Molina* [1987].
[e] *McElroy et al.* [1986]; *Tung et al.* [1986].

Im Wesentlichen werden verschiedene Forschungsergebnisse der (stratosphärischen) Ozonforschung, häufig entsprechende Berichtspassagen zitierend, einfach beschrieben, ohne die sie erklärenden Theorien und Modelle (näher) darzulegen, und einige ihrer Kennzeichen abschließend lediglich knapp zusammenfassend hervorgehoben.

Stratosphärisches Ozon allgemein:

Die meisten Spurengase[134] kontrollieren – neben der Dynamik – den Ozonhaushalt in der Stratosphäre aufgrund vielfältiger homogener, heterogener und photochemischer Reaktionen.

(vgl. Tabelle 3)

„Taken together, the global measurements of HCl, HF, other chlorine compounds, and the CFC source gases both at the surface and in the tropopause region provide direct evidence that the chlorine content of the contemporary stratosphere has been greatly perturbed, with about 85% of the 1992 stratospheric chlorine burden attributable to human activities."
(Solomon 1999:281)

Analysen von seit Ende des 19. Jahrhunderts in Schnee eingeschlossener Luft belegen, dass nichtindustrielle Quellen von FCKWs, Halonen und wichtigen Chlorwasserstoffverbindungen bedeutungslos waren.

In der Troposphäre nimmt die Gesamtmenge ozonzerstörender Verbindungen allmählich ab, nachdem sie in 1992-1994 ihr Maximum erreicht hatte. Während die gesamte Chlorgehalt sinkt, steigt der aus industriell hergestellten Halonen stammende Bromgehalt auch in 2000 immer noch an. Ebenso wächst bislang die Häufigkeit von HFCKWs in der Troposphäre.

Für die Stratosphäre weisen jüngste Messungen darauf hin, dass der gesamte Chlorgehalt inzwischen sein Maximum erreicht haben dürfte, während der Bromgehalt wahrscheinlich auch nach 2000 noch weiter ansteigen wird.

Kurzlebige, Chlor, Brom oder Jod enthaltende organische Spurengase können stratosphärisches Ozon zerstören; jedoch ist die quantitative Abschätzung ihrer ODPs schwieriger als für langlebige Verbindungen. Denn das Maß ihrer Ozonzerstörung hängt signifikant von Ort und Jahreszeit ihrer Emission und den Eigenschaften ihrer Abbauprodukte ab. So sind ihre in dreidimensionalen Modellen berechneten ODP-Werte bislang unsicher, weil sich die komplexen Transportprozesse nur schwer modellieren lassen und weil kaum Daten über ihre troposphärischen Abbauprodukte verfügbar sind.

„Laboratory studies, observations of midlatitude ozone trends, and measurements of stratospheric chemical composition have underscored the need to consider both gas phase and heterogeneous chemistry not only under extreme cold but also under relatively warm conditions." (Solomon 1999:176)

„Along with the(se) catalytic cycles, chemical partitioning processes play a major role in ozone destruction that is dramatically illustrated by the contrasts between F, Cl, and Br gas phase chemistry." (Solomon 1999:280)

„Eine hohe Tropopause ist meist mit niedrigeren Ozonwerten in der unteren Stratosphäre (und umgekehrt) verbunden... Die Tropopausenhöhe über Mitteleuropa (am Hohenpeißenberg) hat langfristig signifikant um 160 m pro Dekade zugenommen. Die entsprechende Änderung der Mächtigkeit der Troposphäre könnte etwa 30% der langfristigen Ozonabnahme in der unteren Stratosphäre erklären: zwei Drittel der beobachteten Ozonabnahme der unteren Stratosphäre wären demnach auf chemische Einwirkung, ein Drittel auf die Anhebung der Tropopause zurückzuführen. Als mögliche Ursache für den beobachteten Anstieg der Tropopause kommt einerseits die fortschreitende Erwärmung der Troposphäre (die Temperatur in der mittleren Troposphäre und die Tropopausenhö-

134 Alle Gase der Atmosphäre außer ihren Hauptbestandteilen Stickstoff (78,1%) und Sauerstoff (20,9%) werden als Spurengase bezeichnet, wobei ihr Anteil außer für Argon (0,9%) je nach Komponente zwischen etwa 1 ppt und 1 ppm liegt, mit CO_2 (360 ppmv) an der Spitze.

he sind positiv korreliert) und andererseits die Abkühlung der Stratosphäre durch den anthropogenen Treibhauseffekt sowie den langfristigen Ozonabbau in Frage. Der Anstieg der Tropopausenhöhe wäre demnach auch ein Indikator für grundlegende Veränderungen in der Erdatmosphäre, die auch auf die Ozonschicht einwirken und zu Trends beitragen können.“ (BMBF 2000:84)

Antarktis:

Der durch Halone verursachte Ozonabbau im antarktischen Frühling führte bei den monatlichen Mittelwerten zu um 40-55% und kurzzeitig während z.B. einer Woche auch bis zu um 70% niedrigeren Ozonwerten (gemessene Ozonminima von ca. 90 DU) im Vergleich mit den vor 1980 mit ca. 300 DU gemessenen Werten der gesamten Ozonsäule (Wayne 2000:240, WMO 2003). Die Größe des Ozonlochs variiert dabei von Jahr zu Jahr und es ist noch offen, ob seine Fläche bereits ihr Maximum erreicht hat. Außerdem bestand das Ozonloch in den letzten Jahren bis in den antarktischen Sommer hinein mit entsprechender, daraus resultierender Zunahme die Erde erreichender UV-Strahlung.

„In short, the vertical, latitudinal, and seasonal behavior observed in active chlorine and a host of related species all provide independent evidence confirming the basic processes that control the occurrence of the ozone hole.” (Solomon 1999:289)

„The depletion of the Antarctic ozone column is largely confined to altitudes from ~12 to 25 km, far below the altitudes where gas phase chlorine chemistry would predict major changes.” (Solomon 1999:283)

„Through the(se) heterogeneous reactions, the chemical partitioning of chlorine in the Antarctic lower stratosphere in spring can be greatly perturbed in comparison with gas phase chemistry, making chlorine (and its coupling with bromine) far more damaging to ozone than it would be in a gas phase framework” (Solomon 1999:287)

„McElroy et al. (1986) and Tung et al. (1986) emphasized the role of bromine chemistry in ozone hole formation (in particular, its coupling to chlorine through the reaction between ClO and BrO); this cycle is now known to contribute about 20% to the annual formation of the Antarctic ozone hole (e.g., Anderson et al. 1989). Both McElroy et al. (1986) and Tung et al. (1986) also emphasized the need for reduced NO_2 in order for ClO to remain active (noting the links to the Noxon cliff[135]).” (Solomon 1999:286f)

„Several authors have emphasized the importance of atmospheric waves in modulating the temperatures and sunlight that influence the ozone loss process, while others have underscored the role of interannual variability in dynamical conditions in determining not only the temperature-dependent chemistry but also the re-supply of ozone into the depleted region, hence modulating the chemistry… Since ozone provides the primary source of heat to the stratosphere through its absorption of UV radiation, Shine (1986) noted that the ozone hole should be expected to lead to a stratospheric cooling, which in turn could make
heterogeneous chemistry even more effective.” (Solomon 1999:287)

Arktis:

In einigen jüngsten kalten arktischen Wintern erreichte der dortige Ozonabbau 30%, während er in den relativ wärmeren Winterjahren gering war. Die Bildung eines stabilen arktischen Ozonlochs erscheint jedoch aufgrund der dortigen wechselhafteren, mit größerem meridionalen Luftaustausch

135 Noxons Cliff bezeichnet den von Noxon (1978) beobachteten signifikanten Abfall des (stratosphärischen) NO_2-Gehalts etwa am 50. Breitengrad hin zur südpolaren Regionen, der damals nicht verstanden wurde.

verbundenen meteorologischen Bedingungen sehr unwahrscheinlich. Aufgrund der orographisch bedingten komplexen arktischen Stratosphärendynamik mit einem weniger stabilen Polarwirbel sind eindeutige (prognostische) Aussagen über deren Entwicklung und daraus resultierenden Ozonabbauraten nicht möglich[136], da diese von geringfügigen Änderungen, z.B. der Temperatur oder der Stärke der Zufuhr bzw. der Bildung von Aerosolen abhängen.[137] Infolgedessen spielt die Dynamik in der arktischen Stratosphäre genauso eine entscheidende Rolle für signifikanten Ozonabbau und die Bildung kleiner (kurzzeitiger) Ozonlöcher[138] wie die notwendigen heterogenen Reaktionen an PSCs.[139]

In den arktischen Wintern 1994/95 und 1999/2000 wurde eine weit verbreitete und anhaltende (insbesondere durch die Sedimentation von PSC-Teilchen vom Typ 2 bedingte) Denitrifizierung beobachtet, die zu verstärktem Ozonabbau führt. Modellsimulationen prognostizieren, dass fortgesetzte Denitrifizierung in zukünftigen kalten arktischen Wintern die Regeneration der Ozonschicht weiter verzögern kann, noch über die allein aus sinkender Temperatur resultierende Verzögerung hinaus.

Mittlere Breiten:

Auch in den mittleren Breiten beider Hemisphären hält der Ozonabbau – bei jährlichen Varianzen – an, wobei er nur in der Nordhemisphäre aufgrund jahreszeitlich variierender atmosphärischer Dynamiken wahrscheinlich zumindest teilweise jahreszeitlich schwankt.[140]

In mittleren Breiten wird der Ozonabbau in der oberen Stratosphäre (ca. 30-50 km) primär durch chlorinduzierte katalytische Abbauzyklen in der Gasphase und in der unteren Stratosphäre (ca. 10-25 km) primär durch chlor- und brominduzierte katalytische Abbauzyklen in viel rascher ablaufenden (und daher anteilig weit bedeutsameren) heterogenen chemische Reaktionen bestimmt (vgl. Tabelle 4). Allerdings können in letzterer auch Veränderungen in der atmosphärischen Dynamik

136 „Because Arctic temperatures are often near the threshold for polar stratospheric cloud (PSC) formation and hence the initiation of perturbed chemistry, there is a strong sensitivity to model temperature biases of only a few degrees Celsius. This places severe limits on the ability of the models to simulate past and predict future Arctic ozone behavior in winter." (WMO 2000:xxixf)

137 „The more complex dynamics of the Arctic vortex as compared with the Antarctic demands the application of sophisticated tools for analysis of ozone destruction. The greater wave activity of the Northern Hemisphere can enhance ozone losses even in winter by increasing the exposure of polar air to sunlight in the distortions caused by atmospheric waves, as compared with the Southern Hemisphere. However, the same wave activity can warm the air and perhaps even distort it sufficiently to mix with its surroundings, thus reducing ozone depletion." (Solomon 1999:298)

138 „Wenn durch ein troposphärisches Hochdruckgebiet unterhalb des stratosphärischen Kältegebietes zusätzliches Aufsteigen der Luft erzwungen und damit die Tropopause angehoben wird, treten die sogenannten Ozon-Minilöcher auf." (BMBF 2000:28)

139 „Taken together, the(se) combined approaches to transport analyses using tracers, matches, chemical transport models, or Lagrangian calculations together with ozone and trace constituent observations provide strong evidence for a chemically driven Arctic ozone loss (order of 60-120 DU) in several recent years. Each approach is subject to different sources of quantitative error and uncertainty, such as inaccuracies in temperature data used as input in observationally-based transport studies, incomplete understanding of the factors influencing tracer-tracer correlations, and small scale dynamical processes that are not well represented in modelling studies (e.g., mountain waves). In spite of these shortcomings and in contrast with the Antarctic, there is substantial evidence for a dynamical contribution to recent trends as well." (Solomon 1999:298)

140 „They have also contributed to winter/spring trends in the Northern Hemisphere. However, because chemical and dynamical processes are coupled, their contributions to ozone changes cannot be assessed in isolation." (WMO 2003:xv)

eine wesentliche Rolle spielen, sodass die Gegebenheit spezifischer chemischer Bedingungen weniger bedeutsam sein könnte als bislang vermutet (vgl. EU-Commission 2001:l34f).

„Chemical measurements after Pinatubo have identified many signatures of heterogeneous reactions on sulfate aerosols at midlatitudes that are akin to those occurring in the ozone hole region." (Solomon 1999:294)

„Observations from many other ground-based sites confirm that the enhancements in aerosol of the 1960s had little effect on ozone. Only since about 1980 have chlorine levels become sufficiently elevated that volcanic perturbations to ClO/Cl_y … result in significant ozone loss. Hence the evidence suggests that volcanic particles at midlatitudes [indirectly] exacerbate halogen-induced ozone depletion in the contemporary stratosphere (much as PSCs do for polar regions, and with some similar chemistry) but cannot on their own significantly destroy stratospheric ozone." (Solomon 1999:295)

Es bleibt ungewiss, ob und in welchem Ausmaß in mittleren Breiten Gebirgswellen zur Bildung von Eispartikeln in der Tropopause und dadurch zur Aktivierung von Halogenen und Ozonabbau beitragen können. „Ozonabbau und Treibhauseffekt verstärken sich gegenseitig im Frühjahr, indem sie [vermutlich] einen stärkeren und stabileren stratosphärischen Wirbel bewirken. Diese Änderungen haben einen Einfluss auf das troposphärische Klima im europäischen Raum, da eine enge Kopplung zwischen der Stärke des stratosphärischen (arktischen) Wirbels und der troposphärischen Zirkulation über dem Nordatlantik existiert." (BMBF 2000:113)

Wie auch entsprechende Modellrechnungen nahe legen, stellen die nordatlantische (NAO) und die arktische Oszillation (AO), die besonders ausgeprägt mit der Stärke der polaren Vortex zusammenhängt, wichtige länger dauernde periodische Zyklen in der Atmosphäre dar, um Veränderungen in der Atmosphäre zu verstehen, die von stratosphärischen Aerosolen, stratosphärischem Ozonabbau, veränderter Solaraktivität und der Akkumulation von Treibhausgasen ausgelöst werden.

Tab. 5.2: Zusammenfassung entscheidender Indizien des Ozonabbaus
Quelle: Solomon 1999:303

Observation	*Method*	*Latitude*	*Altitude*	*Primary Chemistry Linkage*
Profile shapes of upper stratospheric ozone depletion and ClO/Cl_y	satellite and ground-based	Northern Hemisphere midlatitude	30–50 km	Gas phase chlorine chemistry, particularly partitioning processes
Latitudinal structure of upper stratospheric ozone depletion and ClO	satellite	Polar, midlatitude, and tropical	30–50 km	Gas phase chlorine chemistry, particularly HCl/ ClO
Latitudinal structure of ClO, HCl, NO, NO_2, and ozone loss in polar regions	airborne and satellite	50°–85°S, 50–85°N	20 km	Heterogeneous chlorine activation and NO_2 suppression
Vertical structure of seasonal ozone loss and PSCs in polar regions	balloon-borne, lidar, and satellite	90°S, 50°–85°S, 50–85°N	12–24 km	Heterogeneous chlorine activation
Seasonal changes in PSCs, ozone depletion, OClO, ClO, HCl, and $ClONO_2$	balloon-borne, lidar, ground-based, and satellite	50°–90°S in both polar regions	~12–24 km and column	Heterogeneous chemistry
Post-Pinatubo (~1992–1995) ozone depletion and recovery; contrast with post-Agung (~1964–1968)	ground-based and some satellite	midlatitudes and polar regions	near 20 km and column	Heterogeneous liquid surface chemistry relating to chlorine
Post-Pinatubo changes in stratospheric chemical state and aerosol content (NO_x, ClO, HNO_3, OClO)	airborne, ground-based, balloon-borne, and satellite	midlatitudes and some polar	near 20 km, near tropopause, and column	Heterogeneous chemistry, particularly N_2O_5 hydrolysis and some chlorine activation

chemische Stoffe und Laboruntersuchungen:

Eine Laboruntersuchung der Bildungsrate von Chlormonoxid-Dimer (Cl_2O_2) als Hauptträger des polaren katalytischen Abbauzyklus ergab einen je nach Temperatur um bis zu 25% höheren Wert als vorangehende Datenextrapolationen hin zu polaren Temperaturen, was rascheren Ozonabbau impliziert.

„The understanding of what causes denitrification has been improved considerably by the discovery in 1999-2000 of large nitric-acid-containing particles (with diameters of 10 to 20 micrometers) in the Arctic polar lower stratosphere. Sedimentation of these particles can account for observed Arctic denitrification, although the mechanism of formation of these sedimenting particles is uncertain. Therefore, sedimentation of ice containing dissolved nitric acid, which has been the generally assumed mechanism in global stratospheric models, is not the dominant mechanism in the Arctic." (WMO 2003:xx)

„There is evidence from field, laboratory, and modelling studies that PSCs can be composed not only of solid water ice and nitric acid hydrates but also of liquid solutions of water, sulphuric acid, and nitric acid. The chemistry associated with these varying surfaces displays important differences in detail but has the common feature that all can suppress NO_2 and activate chlorine from the reservoir species, making the ozone depletion process more continuous in temperature and less dependent upon the abrupt temperature thresholds that are associated with formation of solids than was previously thought." (Solomon 1999:303)

„Laboratory studies have shown that water ice, NAT, and liquid ternary solutions are all effective for activating chlorine heterogeneously, but with differing efficiencies and with different dependencies on temperature, water vapor abundance, and pressure. These dependencies are related to the thermodynamics of the different surfaces, which control not only their surface areas but also their composition (especially the uptake of HCl onto/into the particles)… Liquid PSCs can be comparable to or more effective than solid PSCs for many surface reactions at temperatures below ~195 K at 20 km." (Solomon 1999:291)

Der in den letzten beiden Jahrzehnten auf der Nord- und der Südhalbkugel beobachtete Anstieg des NO_2-Gehalts um 5% je Jahrzehnt ist doppelt so hoch wie die Zunahme von troposphärischem N_2O, der Hauptquelle von stratosphärischem NO_2. Zweidimensionale Modellrechnungen deuten darauf hin, dass diese Differenz aus einer längerfristigen Veränderung des NO_x/NO_y-Verhältnisses[141] resultiert, die durch die in ihrer Gesamtheit effektive Abnahme stratosphärischer Aerosole verursacht wird, die wiederum nach den Eruptionen von El Chichon und Pinatubo erfolgte.

Das Ozonzerstörungspotenzial von stratosphärischem Brom resultiert vor allem auch aus der Fähigkeit seiner wichtigsten Reservoirsubstanzen ($BrONO_2$ und HOBr) zu heterogenen Reaktionen an kalten stratosphärischen Aerosolen. Dies führt zu einer Verminderung der stratosphärischen NO_2-Konzentration und einer Aktivierung der ozonschädlichen Chlor-verbindungen auch außerhalb des Polarwirbels und ohne dass PSCs vorhanden sein müssen (BMBF 2000:55).

UV-Strahlung:

Außerhalb der Antarktis kann der Einfluss anderer Faktoren auf die (bodennahe) UV-Strahlung die gleiche Größenordnung wie derjenige des Ozonabbaus erreichen. So ergab die erneute Analyse von TOMS-Satellitendaten, dass Veränderungen in der Bewölkung die durch Ozonabbau bedingte verstärkte UV-Strahlung in manchen Regionen teilweise kompensiert.[142]

„Die Beeinflussung bei durchbrochener Bewölkung ist nicht nur vom Bedeckungsgrad und dem Wolkentyp abhängig, sondern auch von der Position der Wolken am Himmel. Um diese Situationen zu erfassen, wurden dreidimensionale Modelle für die Modellierung von UV-Strahlung eingesetzt" (BMBF 2000:98f), ohne allerdings die Effekte von Wolken bereits hinreichend verstanden zu haben und beschreiben zu können.

Modelle:

„Modeling studies indicate that changes in ozone, well-mixed greenhouse gases, and stratospheric water vapor can explain the major features of the observed global and annual-mean stratospheric cooling over the past two decades. Cooling due to ozone depletion dominates over the impact of well-mixed greenhouse gases in the lower stratosphere, while upper stratospheric temperature trends are due, roughly equally, to ozone and well-mixed greenhouse gas changes." (WMO 2003:xxii)

141 NO_x bezeichnet die Summe an aktivem Stickstoff, Stickoxide, $NO + NO_2 + NO_3 + 2\ N_2O_5 + ...$ NO_y bezeichnet die Summe an reaktivem (verfügbarem) Stickstoff, $NO_x + HNO_3$.

142 „High quality ground-based UV measurements are needed to determine the climatology and any long-term changes. The quality of UV measurements has increased significantly due to improved quality control procedures, quantification of uncertainties, and verification by European instrument intercomparisons. This has been the basis for building a common European UV network and database of known quality. These measurements have been used for validating satellite estimates of surface UV radiation, allowing improved estimates of global and regional UV radiation distributions." (EU-Commision 2001:17)

Zweidimensionale Modelle, die beobachtete Veränderungen in halogenierten Kohlenwasserstoffen, Spurengasen und Aerosolen berücksichtigen, geben die beobachteten langfristigen Änderungen des Ozongehalts in mittleren Breiten grob wieder.[143]

Der im arktischen Polarwirbel beobachtete Ozonverlust wird in Modellrechnungen durchweg, einschließlich dreidimensionaler Chemie-Transport-Modelle unterschätzt (vgl. BMBF 2000:50)

„In summary, the 2-D model studies lend support that increases in halogens, in conjunction with in situ halogen activation and nitrogen deactivation on aerosols at mid-latitudes, are responsible for both periods of relatively low column ozone at northern mid-latitudes (following large volcanic eruptions) and for the overall downward trend. However, it appears that the current models, using recommended rate data, underestimate this trend by as much as 20 %. It remains to be seen how this relates to the contribution of about 30% of the observed trend attributed to dynamical changes." (EU-Commission 2001:185)

„Based on 2-D model results it appears that increases in chlorine and bromine, acting in conjunction with in situ mid-latitude aerosols, have contributed around 70-80% to the observed trend. The remaining trend could be accounted for by uncertainties in mid-latitude chemistry or export of polar vortex air. However, based on the empirical regression model studies, it is likely that dynamical changes have contributed considerably to the mid-latitude trend, in particular in the lowermost stratosphere at mid-latitudes… No single model study has combined all of the possible contributions to the observed mid-latitude trend. Rather, each study has focussed on one or more of the possible processes. Therefore it is not straightforward to combine the results to determine the overall contributions to the observed trend. Indeed, by simply adding together the estimates of the various processes, the observed trend would be exceeded. It is possible that some of the diagnosed dynamical effects are a feedback from the chemical effects driven by increases in halogens (or the reduction in ozone itself), or that climate changes may lead to stratospheric cooling and dynamical changes which force chemistry. It is clear, however, in future fully coupled chemical dynamical radiative studies will be required to quantify the effect of these processes in a self-consistent way." (EU-Commission 2001:186f)

„Trotz der in den letzten Jahren erzielten Fortschritte zu einem besseren Verständnis des globalen Klimasystems konnte bisher noch kein Modell der Atmosphäre entwickelt werden, mit dem zuverlässige Prognosen der zukünftigen Entwicklung der stratosphärischen Ozonschicht gemacht werden könnten." (BMBF 2000:116)

Solche Modelle müssen diverse Variabilitätsmoden berücksichtigen wie die zweijährige Windschwingung in der tropischen Stratosphäre (Quasi-Biennial Oscillation: QBO), mehrjährige Schwingungen der Meeresoberflächentemperaturen im Pazifik (El Nino), den elfjährigen Zyklus der Sonnenaktivität als auch sporadische Vulkanausbrüche.

„There is a need to improve further the performance of climate models with a full representation of the stratosphere to remove the cold bias which has a significant impact on simulations of polar chemistry. The substantial increase in computer power over the last 5-10 years will allow these developments to continue, possibly with the use of more realistic parameterisations of gravity wave drag, increased model resolutions and coupled ocean models. More complete coupled chemistry-climate models need to be developed to incorporate realistic atmospheric chemistry as well as de-

143 Auch zweidimensionale Modelle können einige wichtige Wechselwirkungen zwischen Photochemie, Strahlung und Dynamik internalisieren. Dennoch: „the goal of a completely self-consistent two-dimensional model is denied by our inability to model the eddies in a completely interactive fashion. " (WMO 1986:17)

tailed stratospheric chemistry to allow improved simulations of climate and surface ultraviolet amounts. The uncertainties in the properties and distributions of polar stratospheric clouds, which are important for ozone depletion in the lower stratosphere, need to be reduced, and more accurate schemes need to be incorporated into models. Uncertainties in the transport of long-lived atmospheric constituents, due to the type of the applied algorithms, need to be reduced. A detailed quantitative comparison between observed stratospheric trends and model simulations is required. This will enable future ozone and temperature predictions to be made with more confidence… Predictions using more reliable climate and chemical models are required to provide more information about the likely future evolution of stratospheric ozone and temperature… External impacts on the atmosphere due to solar forcing and volcanic eruptions need to be better understood and simulated in coupled chemistry-climate models… The cause(s) of the observed increase in stratospheric water vapour need to be identified and incorporated into climate models. This suggests the need for investigating in detail the model treatment of stratosphere-troposphere exchange in the tropics." (EU-Commission 2001:192)

theoretische Erklärungen und Erklärungsnotwendigkeiten:

Eine detaillierte und kohärente Quantifizierung von dynamischen gegenüber chemischen oder mikrophysikalischen Anteilen durch beides kombinierende Modellstudien gibt es immer noch nicht und wäre von starkem Interesse (vgl. EU-Commission 2001:136). Außerhalb der Antarktis lässt sich die längerfristige Entwicklung des Ozonhaushalts kaum einer (chemisch oder dynamisch bedingten) Hauptursache zuschreiben. Dabei können in mittleren Breiten die relativen Beiträge unterschiedlicher (chemischer und dynamischer) Einflussfaktoren[144] zum resultierenden Ozongehalt von Jahr zu Jahr und von Nord- zu Südhemisphäre variieren.

„Indeed, it is the structure of the ozone loss in space (e.g., in the 40-km region) and time (e.g., in the Antarctic spring and in midlatitudes in the years following Pinatubo) that tests and confirms scientific understanding, illustrating how gas phase and heterogeneous modulation of ClO/Cl_y partitioning affects ozone depletion." (Solomon 1999:304)

„Initial observations of Antarctic chemistry … showed evidence both for heterogeneous chlorine activation on PSCs and for denitrification. An understanding emerged that chlorine-activating reactions took place on solid PSCs in Antarctic winter, accompanied by denitrification that allowed the depletion to persist in spring, even in the absence of further PSC formation. This picture was simple and easy to explain in chemical terms. However, the current understanding suggests that denitrification can increase ozone destruction somewhat but is not required for polar ozone losses. This is because chlorine activation can continue to occur on liquid aerosols in spring, keeping the chlorine active in sunlit air whether denitrified or not. Observations following the eruption of Mount Pinatubo support the view that liquid aerosol chemistry has been a key factor in determining the depth of the ozone hole after major eruptions. More generally, the expansion of heterogeneous chemistry from ice, to NAT, to liquid sulfate aerosols has lessened the expected dependence of the ozone loss on extreme cold to one of relative cold, thereby expanding the height, time, and latitude

144 EU-Commission (2001:174f) führt die folgenden auf: „local chemical processes acting at mid-latitudes, either based purely on gas phase chemistry or related to heterogeneous reactions on sulphuric acid aerosols; export of ozone poor air from the polar vortex during winter and spring, and dilution of ozone poor air when the vortex breaks down; export of chlorine activated air from the polar vortex, which can then destroy ozone in mid-latitudes; a positive trend in the frequency of subtropical intrusions of upper tropospheric air into the mid-latitude lowermost stratosphere, concomitant with increases in the local tropopause height; conceivably also a negative trend in the frequency of polar intrusions, also concomitant with net increases in the local tropopause height; a trend in the large-scale meridional (Brewer-Dobson) circulation of the stratosphere, which transports ozone from its tropical source region to the mid-latitude lower stratosphere."

ranges where ozone depletion may be expected to be enhanced by heterogeneous processes that affect chlorine partitioning." (Solomon 1999:292)

Evaluation und Validierung:

Vor dem Hintergrund der möglichen beträchtlichen politischen/regulativen Bedeutung von Ozonwerten und -trends spielen Qualität und Eindeutigkeit der Messwerte eine zentrale Rolle. Die in dieser Hinsicht seitens der Wissenschaft unternommenen Anstrengungen zur Evaluation von Messverfahren zeichnen sich vor allem in der fünften Phase durch weitreichende vergleichende Studien aus, um z.B. die Stringenz der beobachteten Ozontrends zu validieren. Insgesamt sind für die Entwicklung von Messverfahren zwei sich herausbildende Merkmale festzuhalten: „First, intercomparisons between different methods for measuring ozone have frequently proved important, allowing scientists to reevaluate the data on which previous conclusions were based. Second, long-term environmental monitoring data has proved to be invaluable." (Farrell 2005:73)

Ein Einfluss von FCKWs auf den stratosphärischen Ozonhaushalt muss insbesondere in entsprechenden, durch vielfältige, bereits erwähnte andere Einflüsse überlagerten Trends der Ozonwerte zum Ausdruck kommen. Die von verschiedenen (Bodenstationen, Satelliten, in situ) Messplattformen aus quantifizierten Trends differieren jedoch insbesondere in Höhen zwischen 15 und 20 km, und damit genau dort, wo im Allgemeinen der stärkste Ozonabbau zu beobachten ist. Deshalb wurde – in einer dem die absoluten Ozonwertmessungen überprüfenden International Ozon Trends Panel (WMO 1988) analogen Vorgehensweise – ein umfangreiches Assessment der durch Messungen verfügbaren Trends durchgeführt, das die diesbezügliche Literatur nicht nur kritisch überprüfte, sondern die präsentierten vertikalen Ozonprofile anhand der Rohdaten erneut analysierte und interpretierte, um die Qualität der Daten einschließlich einer quantitativen Fehlerabschätzung zu validieren und mögliche höhen- und breitenbezogenen Grenzen zu bestimmen (WMO 1998). Denn es existiert kein Messverfahren, das in jeder Höhe zu Messungen mit angemessener globaler und zeitlicher Reichweite in der Lage ist, sodass verschiedene Messinstrumente und -techniken kombiniert werden müssen.

Die in den verschiedenen Messreihen angegebenen Ozonwerte hängen dabei zum einen von Aufbau, Arbeitsweise und Kalibrierung der Messinstrumente und der Berechnungsmethode der Rohdaten ab, wobei jeder Instrumententyp unterschiedliche Schwachstellen und Abhängigkeiten aufweist (z.B. Aerosolkontamination, vertikale Auflösung, räumliche Abdeckung, Grundrauschen, Pumpenstärke, Algorithmus). Sodann hängt der aus den Messreihen berechnete Trend vom hierfür benutzten statistischen Verfahren ab. Schließlich weisen alle Messinstrumente sowohl über ihre Lebensdauer etwa infolge von Materialermüdung sich allmählich ändernde Messwerte als auch typischerweise kleine Differenzen in den Messwerten gegenüber ihren Nachfolgeinstrumenten auf. Die aus dieser Drift herrührenden Unsicherheiten konnten für alle Messsysteme bis auf die troposphärische Brewer-Mast Ozonsonde auf weniger als 5% pro Dekade geschätzt werden. Die zur Trendberechnung benutzten statistischen Verfahren unterscheiden sich in ihren Ergebnissen nur minimal. Zum zweiten sind die Ergebnisse unterschiedlicher Messreihen zu vergleichen und deren Abweichungen voneinander zu erklären.[145] Dabei sind Trendunterschiede in den jeweils angegebenen, höhenabhängig variierenden Trends in Abhängigkeit etwa von Zeitdauer, Zeitraum und Zeitpunkt der Messungen zu bestimmen und zu erklären.

145 Die Übereinstimmung individueller Messwerte (gleicher Ort, gleicher Zeitpunkt) verschiedener Messstationen kann sehr sensibel von kurzfristigen oder kleinräumigen Veränderungen abhängen. So „it was found for example when validating Nimbus 7 LIMS data, that even 3 hours could make an important difference in the temperature agreement." (WMO 1998:101)

Abb. 5.1 zeigt Trendunterschiede zwischen Ozon-Messreihen für unterschiedliche Höhen, normiert auf die mit am besten kalibrierte Satelliten-Messreihe von SAGE II (Stratospheric Aerosol and Gas Experiment).

Zusammenfassend lässt sich für die hier aufgelisteten, insgesamt als typisch einzustufenden Ergebnisse der (stratosphärischen) Ozonforschung festhalten, dass sie einerseits vorrangig Stoffgehalte und diese bestimmende Prozesse betreffen, die mit dem durch menschliche Aktivitäten verursachten Ozonabbau zusammenhängen, die sie andererseits als und durch davon unabhängige, allgemeine (physikalische und chemische) Strukturen und Prozesse zu beschreiben und erklären suchen, die für das Ozonproblem spezifiziert werden. Deren generelle

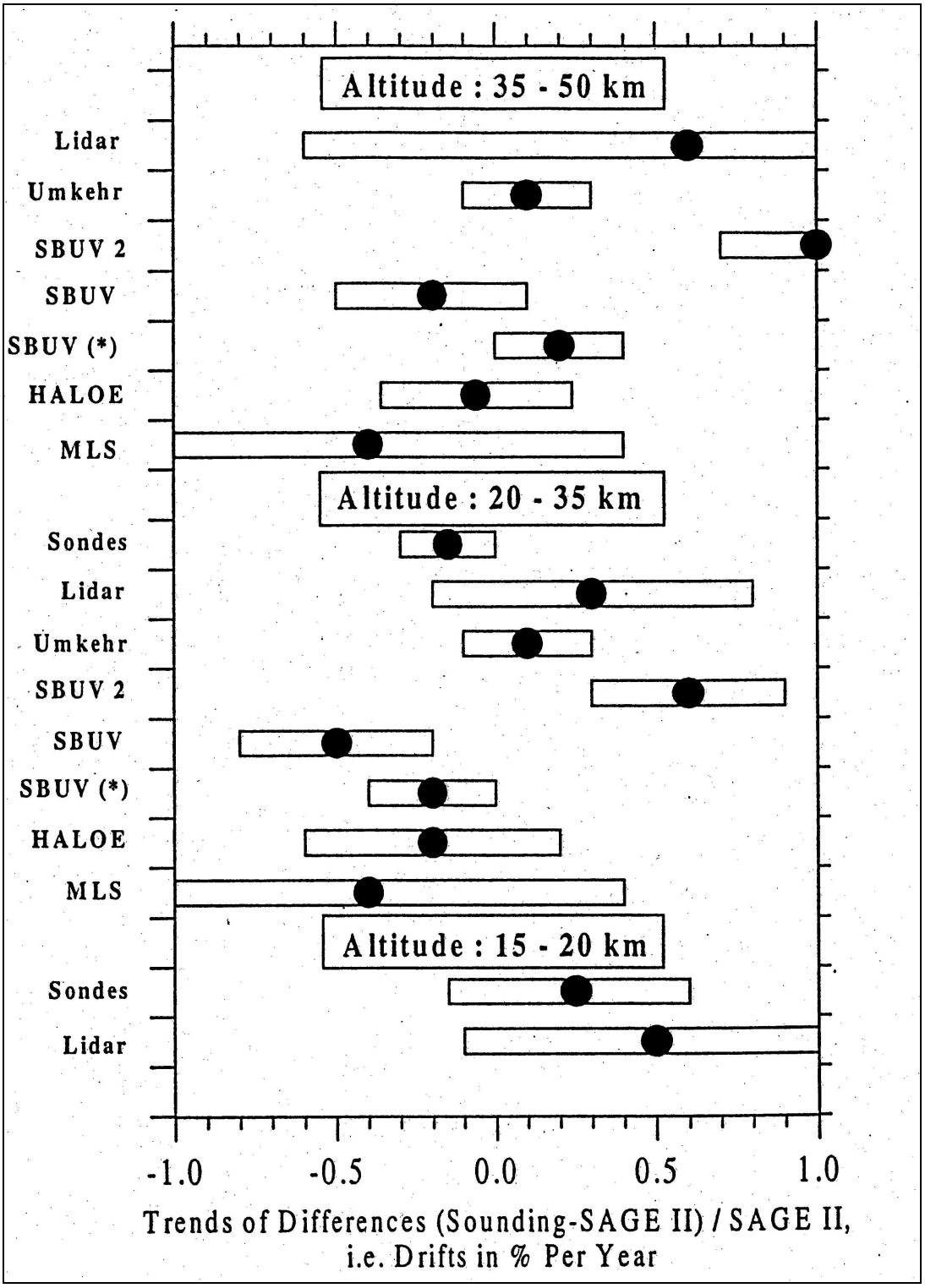

Abb. 5.1: Trendunterschiede zwischen Ozon-Messreihen für unterschiedliche Höhen
Quelle: WMO 1998:181

theoretische Durchdringung im Sinne eines grundsätzlichen Verständnisses dieser atmosphärischen Zusammenhänge und Dynamiken ist aber zugleich oft erst noch zu leisten. Dabei stehen typischerweise zum einen spezielle Phänomene (z.B. arktischer Polarwirbel, PSCs, NAO, Pinatubo-Eruption) und ganz bestimmte physikalische oder chemische Gegebenheiten und Mechanismen (z.B. heterogene katalytische Abbauzyklen von Cl, Photolyseraten von NO_2 oder O_3, barotrope (Rossby-)Wellen) im Vordergrund, und zum anderen interessieren insbesondere deren Wechselwirkungen (z.B. zwischen Ozonabbau und Klimaveränderungen, zwischen chemischen und dynamischen Prozessen wie etwa zwischen sedimentationsbedingter, PSC-Teilchen vom Typ 2 involvierender Denitrifizierung und verstärktem Ozonabbau durch hieraus resultierender forcierter Chloraktivierung), um erst durch das Verständnis und die Modellierung dieser Wechselwirkungen die tatsächliche Entwicklung des Ozonhaushalts nachvollziehen und erklären zu können.

Ergänzend sind die hier nicht weiter dargestellten methodischen Entwicklungen im Rahmen von Laborexperimenten (z.B. um Experimente an einzelnen Aerosolen durchführen, Photolyseprodukte identifizieren oder die Kinetik der Reaktionen von XO-Radikalen (X=Cl,Br,I) untersuchen zu können), Messplattformen, Messinstrumenten und Modellbildung zu nennen. Außerdem ist anzumerken, dass Forschungsergebnisse in Bezug auf Anreicherungsprozesse bodennahen Ozons, FCKW-Substitute oder industrielle (verfahrenstechnische) Nutzungen von Ozon, hier nicht betrachtet wurden. Deren erklärende Theorien und Modelle unterscheiden sich substanziell durchweg klar von denjenigen der atmosphärischen (stratosphärischen) Ozonforschung und werden darum nachfolgend nicht weiter erörtert.

6 Erklärende Theorien und Modelle und ihr disziplinärer Hintergrund

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 ihres jüngeren Entstehungszusammenhangs, wie bereits mehrfach ausgeführt, nach 1970 besonderes Augenmerk auf das Verständnis des anthropogen verursachten Ozonabbaus gerichtet wurde. Ohne auf im Laufe der Entwicklung der Ozonforschung früher genutzte, jedoch inzwischen überholte Erklärungsmodelle einzugehen, versuchen die folgenden Ausführungen ein kompaktes Bild dieser Theorien und Modelle zu geben, ohne diese selbst darzustellen, wobei sie im Wesentlichen die bei der bisherigen Rekonstruktion der Ozonforschung schon des Öfteren benannten Theorien und disziplinären Einbettungen resümieren.

Im (kaum kontroversen) Ergebnis handelt es sich bei der (stratosphärischen) Ozonforschung um die kombinierte Nutzung von (überwiegend kausalen) Theorien aus

– Photophysik und Photochemie (inklusive ihrer Kopplung), einschließlich der Messung und Erklärung von bei bestimmten Wellenlängen absorbierter 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 abbilden146 und darüber hinaus wirksame (nichtlineare) Wechselwirkungen zwischen diesen verschiedenartigen Prozessen sowie allgemeine, im Prinzip relevante Interaktionsdynamiken formal rekonstruieren und modellieren.147

Gesamtergebnis dieser Theorien ist im Prinzip ein komplexes (kybernetisches) Prozessbild mit resultierender Ozonkonzentration(sveränderung), Temperatur, Druck etc.[148]

Um die Richtigkeit dieses disziplinenbezogenen Gesamtbildes der die Ozonforschung prägenden Theorien im Einzelnen zumindest exemplarisch nachzuweisen, wäre genaugenommen ihre zentrale Rolle für die präsentierten Forschungsergebnisse jeweils konkret (bis hin zu den verwandten mathematischen Gleichungen) zu belegen. Dies würde den Rahmen dieser Studie allerdings sprengen. Hierzu muss auf die diesbezüglichen wissenschaftlichen Fachveröffentlichungen und Lehrbuchkapitel verwiesen werden. In dieser Studie konnten die die einzelnen Prozesse beschreibenden und erklärenden naturwissenschaftlichen Theorien, die in den entsprechenden Lehrbüchern dargestellt werden, in den vorangehenden Kapiteln lediglich fallbezogen mehrfach bezeichnet werden.

Nachfolgend sollen ergänzend Rolle und Arten von Modellen noch etwas genauer skizziert werden, da die über Modellierung laufende Abbildung und Simulation des Ozonhaushalts den Kern theoretischer Erklärung in der Ozonforschung und speziell des Ozonproblems darstellt. Modellierung stellt zwar ein neues, erst in den letzten beiden Jahrzehnten in den Vordergrund getretenes Phänomen dar. Im Kern ist Modellbildung dabei aber letztlich eine Verknüpfung von angewandter Mathematik mit traditioneller Physik und Chemie.

Das interessierende und zu erklärende Phänomen wird typischerweise durch ein System von (gekoppelten) numerisch gelösten Differentialgleichungen beschrieben und modelliert, die die simulier-

146 In diesem Fall gehen die jeweils nicht modellierten Prozesse als extern vorgegebene Randbedingungen ein.

147 Bezeichnenderweise gliedert sich das breiter und umfassender angelegte Lehrbuch „Atmospheric Chemistry and Global Change“ (Brasseur et al. 1999) in ähnlicher Weise in die jeweils mehrere Kapitel enthaltenden Hauptteile: Fundamentals (atmospheric dynamics and transport, chemical and photochemical processes, aerosols and clouds, trace gas exchanges and biogeochemical cycles), Chemical Families (hydrogen compounds, nitrogen compounds, halogen compounds, carbon-containing compounds, sulfur compounds), Tools (observational methods: instruments and platforms, modeling) und Ozone, Climate, and Global Change (tropospheric ozone, middle atmosphere ozone, atmospheric chemistry and climate, atmospheric evolution and global perspective).

148 Dabei können die Werte dieser Größen ihrerseits wiederum spezielle Reaktionsmuster auslösen, wie PSC-Bildung, heterogene Reaktionen an PSC-Teilchen, Sedimentation von schweren PSC-Teilchen mit Denitrifikationswirkung.

ten (physikalischen oder chemischen) Prozesse figurieren, sodass die Modelle im Ergebnis die mathematische (theoretische) Darstellung z.B. des Ozonhaushalts sind, deren Ergebnisse und Prognosen anhand empirischer Messwerte überprüft werden können.[149] Dies regt zum einen die Modifizierung der Modellkonzeption und zum andern die empirische Messung spezifischer Variablen unter bestimmten (zeitlichen und räumlichen) Konstellationen an. Dabei verstehen die mit Modellen arbeitenden Atmosphärenforscher oder Meteorologen im Allgemeinen wenig und nicht die Details von dem die Differentialgleichungen numerisch lösenden mathematischen Algorithmus/Verfahren, den sie üblicherweise einfach (wie der Normalbürger den Strom aus der Steckdose) nutzen[150], während sie sich allein mit den sie interessierenden, im Modell simulierten physikalischen und/oder chemischen Prozessen befassen.[151]

Modelle sind notwendige Werkzeuge zur Untersuchung von atmosphärischen Prozessen. Nur mit Modellen können begründete Prognosen über die zukünftige Entwicklung des Ozonhaushalts erstellt und detaillierte Zusammenhänge der meist komplexen Dynamik und Chemie aufgezeigt werden. „Modelle produzieren in sich konsistente Verteilungen, die den gesamten Parameterraum in allen drei Dimensionen sowie den zeitlichen Verlauf umfassen. Messungen geben eine sehr beschränkte Untermenge davon wieder und weisen für verschiedene Parameter sehr unterschiedliche Messgenauigkeiten auf. Messdaten sind auch inkonsistent aufgrund verschiedenster angewandter Messverfahren. Eine Validierung von Modellergebnissen ist daher so gut wie unmöglich. Wir sprechen daher nur von Evaluierung oder noch weiter abgeschwächt von Plausibilität.“[152] (Feichter, Mitteilung 2005) „Die Verwendung einfacher Modelle war und ist zur Entwicklung komplexerer Modelle wichtig, mit denen die nichtlineare Wechselwirkung verschiedener Prozesse erforscht wird. Die mit einfacheren Modellansätzen gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen helfen bei der Interpretation der Ergebnisse von umfassenderen (gekoppelten) Modellsystemen. Je mehr Prozesse in einem Modell berücksichtigt werden, desto größer werden die Unsicherheiten, mit denen die Ergebnisse behaftet sind. Dies kommt daher, dass in komplexeren Modellen aufgrund der Vielfalt der Wechselwirkungen zwischen den berücksichtigten Prozessen die Interpretation der Ergebnisse immer anspruchsvoller wird und darüber hinaus aus ökonomischen Gründen vereinfachende Näherungen (Parametrisierungen) der Prozesse verwendet werden müssen.“ (BMBF 2000:104f)

Modelle (in der Ozon-, Atmosphären- oder Klimaforschung) unterscheiden sich grob in:

149 „By definition, models are developed to test hypotheses that need to be verified by observations of experiments. Models can be viewed as mathematical representations of the fundamental laws that govern the fate of the atmosphere and other components of the geosphere, and attempt to replicate the complex processes occurring in the natural system.” (Brasseur et al. 1999 : 423)

150 Analog basiert die Messung und Auswertung (atmosphärischer) Messvariabler auf komplizierten, mehrere Komponenten umfassenden Messtheorien, die die Messenden selbst nur rudimentär verstehen müssen. Allerdings sind, wie oben beschrieben, neben der Kalibrierung die Klärung der Ursachen für je nach Messplattform, -verfahren und -instrument variierenden Messwerten desselben Messobjekts als auch der systematischen, auf Veränderungen der Messinstrumente beruhenden (zeitlichen oder z.B. temperaturabhängigen) Drifts der Messwerte sowie entsprechende Korrekturen zentral für die Validität und wissenschaftlich akzeptierte Geltung empirischer Messwerte.

151 Allerdings finden sich auch immer wieder einzelne Wissenschaftler, die an Nachbardisziplinen Interesse entwickeln und sich z.B. als Meteorologen in numerische Verfahren einarbeiten. Solche Grenzüberschreitungen werden durch die gemeinsame Arbeit an komplexen Modellsystemen gefördert und erweisen sich zumeist als wissenschaftlich sehr fruchtbar.

152 Allerdings ist außerdem zu berücksichtigen, dass „das, was in einem Kontext als valide erscheint, in einem anderen Kontext alles andere als valide anzusehen (ist): Validierung ist eine epistemische Praxis, welche im Horizont der Simulationen im Zentrum des Erkenntnishandelns liegt.“ (Gramelsberger 20004:64)

– ihrem zu repräsentierenden Objekt bzw. Fragestellung: z.B. lokale Prozessmodelle versus globale (Klima-)Modelle, Strahlungstransfer-Modelle, (nulldimensionale) Box-Trajektorien-Modelle, mesoskalige Modelle, mechanistische Zirkulationsmodelle, durch die Methode der Konturadvektion dynamische Prozesse in Gebieten mit starken Gradienten hochaufgelöst modellierende Modelle (vgl. BMBF 2000:105ff),
– dem Grad ihrer (räumlichen) Differenzierung: ein-, zwei- und dreidimensionale, die vertikale, meridionale und longitudinale Dimension einbeziehende Modelle,
– dem Maß der Einbeziehung unterschiedlicher Prozesstypen: Kopplung von Chemie, Dynamik, Mikrophysik, Strahlung und Photochemie,
– dem Maß der Einbeziehung unterschiedlicher Sphären: Troposphäre, Stratosphäre, Mesosphäre, Thermosphäre, Ozean, Biosphäre/Erde,
– Modellaufbau, -variablen und -parametern: z.B. mathematische Lösungsprogramme, Skalenparametrisierung, Variablendiskretisierung (spektrale Modelle, Gitterpunktmodelle).

Generell gehen die Bemühungen in der Modellentwicklung dahin, zunehmend mehr Prozesse und mehr Sphären in gekoppelten Modellen modellintern zu repräsentieren, u.a. um das fortschreitend komplexere und differenziertere, (nichtlineare) Wechselwirkungen berücksichtigende theoretische Verständnis der Atmosphäre adäquat simulieren zu können. Ein modularer Systemaufbau erlaubt dabei (in mehrfach gekoppelten Modellen) im Prinzip die beliebige Ankopplung bestimmter Module, die einen bestimmten Bereich, z.B. als Vegetationsmodell, abbilden. Kritischer Punkt ist bei gekoppelten Modellen insbesondere die richtige Wiedergabe der Transferprozesse zwischen unterschiedlichen Sphären, weil z.B. das (sich ändernde) Klima bei diesbezüglichen Fehlern aufgrund der unterschiedlichen Zeitskalen der Prozesse in Atmosphäre und Ozean rasch wegdriften kann.

Während in Chemie-Transport-Modellen (CTMs) die Dynamik im Wesentlichen über Messdaten extern vorgegeben wird, simulieren globale Zirkulationsmodelle (GCMs) die atmosphärische Dynamik unter externer Vorgabe chemischer Kenngrößen.[153]

Seit Ende der 1990er Jahre wurden die GCMs zu Klima-Chemie-Modellen (chemistry circulation models: CCMs) erweitert, die chemische, dynamische und photochemische Prozesse samt ihrer Wechselwirkungen intern berechnen. Abhängig vom interessierenden Untersuchungsobjekt (z.B. Einfluss des 11-jährigen Sonnenflecken-Zyklus) werden in manchen atmosphärischen Modellen mehrere Atmosphärenschichten bis hin zur Thermosphäre gekoppelt und auch modelliert. Schließlich gibt es erste Versuche, über gekoppelte Ozean-Atmosphäre-Modelle hinaus (vollständige) Erdsystemmodelle zu entwickeln, die im Prinzip sowohl sämtliche jeweiligen modulinternen chemischen und dynamischen Prozesse simulieren als auch die Austauschprozesse zwischen den

153 Dabei berücksichtigten insbesondere die weniger komplexen älteren GCMs keineswegs sämtliche relevanten dynamischen Einflüsse, wie WMO (1986:11) festhält: „While general circulation modeling of the middle atmosphere is increasingly proving to be a useful tool in studies of the region, such models continue to have major deficiencies. The most serious of these is their pathology in generating winter high-latitude temperatures far below those observed. Theory suggests that this must be due to an underestimate of eddy transport processes; this could be a result of an inadequate representation of planetary wave activity or of the inability of the models to resolve gravity waves. The role of gravity waves in the actual stratospheric momentum budget requires further study.”

Sphären abbilden. Umgekehrt existieren Bemühungen um gekoppelte Chemie-Transport-Modelle, die die Mikrophysik heterogener Reaktionen und die Photochemie internalisieren.

In Bezug auf den Modellaufbau existieren durchaus einige signifikant unterschiedliche Modelltypen und -entwicklungen in Europa, den USA oder auch Japan. Und die Simulationsergebnisse dieser Modelle differieren teilweise auch deutlich. Z.B. gelangen sie für hohe Breiten zu zwar durchweg zu niedrigen, jedoch klar unterschiedlichen Temperaturen der Stratosphäre im Winter (cold bias). Hier kommt etwa die oben erwähnte Interpretationsabhängigkeit unsicherer Ergebnisse jenseits einer bisweilen divergierenden Interpretation von Messwerten zum Tragen, die möglicherweise auf unterschiedliche verwandte Messreihen und Auswertungsverfahren zurückzuführen ist.

Wie im vorangehenden Kapitel festgehalten, hängt die Möglichkeit und Richtigkeit umfangreicher gekoppelter Modellsimulationen entscheidend von der verfügbaren Rechnerkapazität ab.[154] Je besser der Computer, umso besser ist die Dynamik modellierbar und umso eher können neue, als wichtig erkannte Prozesse zusätzlich berücksichtigt werden.[155]

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 Mesoebene 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.

7 Kontroversen und Schließungen

Nachdem in den beiden vorangehenden Kapiteln (implizit) der heute bestehende weitgehende wissenschaftliche Konsens in der Ozonforschung hervorgehoben wurde[156], geht es in diesem Kapitel im Wesentlichen um für die jeweiligen Phasen der Ozonforschung prototypische Fälle von Dissens und dessen Auflösung. Dabei werden jeweils die konkurrierenden Positionen, wesentliche Gründe für das Bestehen der Kontroversen und ihre Brisanz, ihre Verortung innerhalb und/oder außerhalb der Wissenschaft, und die (wissenschaftlichen) Gründe ihrer Schließung verdeutlicht, während die mit ihnen verbundenen, sie maßgeblich konstituierenden sozialen Prozesse sowie die Motive und Interessen der beteiligten Akteure nicht näher betrachtet werden (vgl. in dieser Hinsicht ausführlich Cagin/Dray 1993, Dotto/Schiff 1978, Grundmann 1999, Liftin 1994, Parson 2003, Roan 1990).

154 „Models can become sufficiently complicated that, even with state of the art supercomputers, the chemical and transport equations cannot be solved in a reasonable amount of computer time. Therefore, compromises have to be made concerning the degree of details included in the models and the spatial resolution used in the numerical treatment of the equations.” (Brasseur et al. 1999 :423)

155 Allerdings muss auch das entsprechende Grundlagenwissen vorhanden sein. So können z.B. durch troposphärische Turbulenzen erzeugte Schwerewellen aus diesem Grund bislang nicht richtig in Modelle eingebaut werden.

156 Dies schließt natürlich ungeklärte Fragen und divergierende Erklärungen nicht aus. Diese werden jedoch vor allem als kooperativ zu lösende Forschungsprobleme angesehen.

Dabei ist zum einen zu fragen, ob die wissenschaftliche Kontroverse für sich allein besteht oder in eine gesellschaftspolitische eingebettet ist, und sind zum andern sinnvollerweise verschiedene Dissens-Niveaus der hier interessierenden primär wissenschaftlichen Kontroversen zu unterscheiden.

Ist die wissenschaftliche Kontroverse wie in den beiden etwas genauer erörterten Fällen 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 erfolgt[157], und dass nicht beide Kontroversen (gleichzeitig) aufgelöst werden müssen.

Im Falle des Ozonlochs lassen sich folgende unterschiedliche Dissens-Niveaus wissenschaftlicher Kontroversen relativ deutlich unterscheiden:

– Aus (unterschwellig) zumeist primär nichtwissenschaftlichen weltanschaulichen (oder ökonomischen) Gründen wurden vehement divergierende Erklärungshypothesen für das Ozonloch propagiert.158 Dabei wurde sogar seine Existenz oder seine anthropogene Verursachung trotz diesbezüglich eindeutiger wissenschaftlicher Indizien geleugnet.159 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.160 Die Schließung dieser zugleich auch gesellschaftspolitischen Kontroverse erfolgte (nach außen) typischerweise durch (in der Öffentlichkeit kommunizierte) entscheidende Experimente und autoritative scientific Assessments.
– Es ist zwischen konkurrierenden, sich grundlegend unterscheidenden, einander mehr oder minder ausschließenden wissenschaftlichen Erklärungen zu entscheiden. Dies waren die un-

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

158 „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)

159 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)

160 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.“

ten beschriebenen dynamische, vulkanische, chemische und Sonnenzyklus-Hypothese, von denen sich die chemische als die zutreffende erwies. Aufgrund der involvierten, typischerweise beträchtlichen reputationswirksamen vested interests verlangt die Schließung solcher Kontroversen zumeist aufwändige, definitive Aussagen erlaubende Untersuchungen161, in denen entscheidende Experimente und Messungen, die Standardisierung von Messverfahren und Datenauswertung und hochrangige Urteile eine zentrale Rolle spielen (können).

– Auf der Grundlage einer im Kern gemeinsamen Theorie werden mögliche unterschiedliche chemische Prozesse als Hauptursache des Ozonlochs postuliert, die sich nicht wechselseitig ausschließen müssen, sondern ergänzen/überlagern können und deren relative Gewichtung offen und kontrovers ist. 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 Kontroverse. 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).

Die nachfolgend als wissenschaftliche Kontroversen beschriebenen Fälle von wissenschaft-lichem Dissens spiegeln für die jeweiligen Phasen der Ozonforschung relevante Dispute und unterschiedliche Maße ihrer gesellschaftspolitischen Einbettung wider.[162] 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.

Wie in Kapitel 3 beschrieben, stand in der 3. Phase 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. Böschen 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, tro-

161 So wurde 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).

162 Kontroversen in den ersten beiden Phasen werden hier nicht betrachtet, weil in ihnen noch kein elaboriertes naturwissenschaftliches Verständnis des atmosphärischen Ozonhaushalts bestand.

posphärische Abbauprozesse, atmosphärische Lebensdauern, stratosphärische Konzentrationen von wichtigen Spurengasen, Reaktionsraten oder Chlorgasreservoire, 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 postulierten[163], die später als in der Stratosphäre tatsächlich in signifikantem Ausmaß stattfindend nachgewiesen wurden. Ihr empirischer Nachweis benötigte jedoch in vielerlei Hinsicht noch unbekannte und zugleich valide Messdaten, die mithilfe verbesserter Messverfahren (seit 1978 einschließlich systematischer Satellitenmessungen) und besseren Modellen (steigende Rechnerkapazitäten) nur allmählich akkumuliert wurden, und vielfach auch 1985 noch nicht verfügbar waren.[164] 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).[165] Diese erfolgte letztlich erst nach der Klärung des Ozonlochs, das als gänzlich un-

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

164 Dies wird etwa an nachfolgenden Aussagen des 1985 vorliegenden, allgemein akzeptierten Assessments der WMO deutlich:

„Only a few atmospheric measurements exist, and there is limited information on emission strengths, for the numerous other halocarbons.“ (WMO 1986:7)

„Simultaneous measurements of odd hydrogen containing species are required over a full diurnal cycle to provide a more critical test of the photochemical models (OH, HO2, H2O2, H2O, in conjunction with temperature, solar flux, O, O3, and NOx determinations… Simultaneous measurements of nitrogen containing species over a full diurnal cycle are required to critically test the photochemical models. These ratio measurements should be taken in conjunction with appropriate measurements of Ox, HOx, and ClOx species… Simultaneous measurements of chlorine-containing species are required to provide a satisfactory test of the photochemical models (Cl, HCl, ClO, and ClONO2, preferably coupled to temperature, solar flux, O3, H2O, CH4 and NOx determinations).“ (WMO 1986:15f)

„The data from frostpoint and fluorescence water vapor instruments have a systematic difference of about 0.75 ppmv (20%), the origin of which remains unknown.” (WMO 1986:24)

165 „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

erwartetes Ereignis die bereits die Hegemonie zu erringen beginnende Theorie von Molina/Rowland (1974) zunächst 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. „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.“[166] (BMBF 2000:21)

Die grundsätzlich kontroversen Hypothesen zur Erklärung des Ozonlochs werden in BMBF (2000:21) folgendermaßen beschrieben:

„*Die dynamische Hypothese*: Vielleicht würde ozonarme troposphärische Luft an den Polen aufsteigen, die ozonreiche stratosphärische Luft verdrängen und so das Phänomen erklären. Erst seit etwa 1988 wurde die Funktionsweise des polaren Wirbels hinreichend klar, nämlich dass gerade umgekehrt die Luft innerhalb des Wirbels im Laufe des Winters absinkt und nicht aufsteigt.

Die vulkanische Hypothese: Vielleicht würden Vulkane Gase emittieren, die in der antarktischen Stratosphäre das Ozon angreifen könnten. Es wurde argumentiert, dass zum Beispiel der antarktische Vulkan Mt. Erebus seine Gase direkt in den polaren Wirbel emittieren würde. Weitere Untersuchungen Ende der 80er Jahre erbrachten allerdings keine Korrelation zwischen dem Auftreten des Ozonlochs und vulkanischen Eruptionen.

Die Sonnenzyklus-Hypothese: Vielleicht würden kleine Änderungen in der solaren Bestrahlung der Erde durch den 11-jährigen Sonnenflecken-Zyklus zu einer periodischen Veränderung der Ozonschichtdicke führen, auf die die Antarktis besonders sensitiv reagiere. Zu Beginn der 90er Jahre wurde die beobachtete Zeitreihe antarktischer Ozonlöcher auch lang genug, um eine solche Erklärung auszuschließen.

Die chemische Hypothese: Vielleicht würde Ozon durch Chlor angegriffen... Die chemische Hypothese konnte aus mehreren Gründen nicht ohne weiteres akzeptiert werden“, insofern für ein Verständnis des Ozonlochs selbst bei Ergänzung der bekannten, vor allem in größeren Höhen als der zentral betroffenen 15-25 km Höhe ablaufenden Gasphasenchemie durch erste bekannte Ansätze zur heterogenen Chemie in der Stratosphäre insbesondere fehlten:

– „ein Mechanismus, der das Chlor effizient aus den Haupt-Reservoirgasen HCl und ClONO2 freisetzt
– ein Prozess, der das NOx passiv werden lässt oder sogar aus der Stratosphäre entfernt, sodass das Chlor stärker aktiviert werden kann

to be settled.“ (Latour 1983:155) In den USA wurden 1980 ca. 6 Prozent des Bruttosozial-produkts für Standardisierung ausgegeben, dreimal so viel wie für Forschung und Entwicklung (Hunter 1980).

166 Es gab allerdings sehr wohl einige Hinweise, die eine frühere theoretische Postulierung des Ozonlochs in Verbindung mit heterogenen Reaktionen erlaubt hätten. Zum einen hätten Satellitenmessungen das Phänomen schon früher erkennen lassen, wären sie nicht, wie bereits erwähnt, über Jahre hinweg als Fehlmessungen automatisch ignoriert worden. Zum zweiten wurde die bereits Anfang der 1980er Jahre theoretisch postulierte heterogene Reaktion der N2O5-Hydrolyse aufgrund falscher Ratenmessungen verworfen. Insofern Labor-messungen über die Relevanz einer Reaktion und damit den Genauigkeitsanspruch and die Messung selbst entscheiden, wäre „ohne diesen Irrtum ... die generelle Wichtigkeit heterogener Prozesse vielleicht vor der Entdeckung des Ozonlochs erkannt worden.“ (BMBF 2000:80) Zum dritten „we now know that the chemistry that produced Noxon’s cliff is tied to that of the ozone hole… Arguably, the ozone hole might have been predicted before it was observed had the Noxon cliff been better understood in the early 1980s.” (Solomon 1999:285)

– ein weiterer durch Chlor induzierter Ozon-Zerstörungszyklus, der ohne die Beteiligung von O-Atomen auskommt
– ein genaueres Verständnis der Meteorologie der antarktischen Stratosphäre besonders im Hinblick auf den Transport von Spurenstoffen und die Bildung von polaren stratosphärischen Wolken.“ (BMBF 2000:22)

Infolgedessen wurden auch innerhalb der chemischen Hypothese drei unterschiedliche katalytische Abbauzyklen postuliert, deren tatsächlicher Beitrag erst noch empirisch bestimmt werden musste (vgl. Anderson et al. 1989, Crutzen/Arnold 1986, McElroy et al. 1986, Molina/Molina 1987, Solomon et al. 1986, Solomon 1999, Toon et al. 1986, Tung et al.1986).

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.[167] Dabei wurde zugleich das notwendige Zusammenspiel von Chemie und (physikalischer) 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 gesellschaftspolitisch die Umsetzung eines internationalen Regimes auf der Grundlage grundsätzlich als bedrohlich anerkannter anthropogener Quellen 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 werden, an deren Lösung ein gemeinsames wissenschaftliches Interesse besteht. Kontrovers ist meist lediglich das theoretisch postulierte, aber experimentell noch nicht gemessene quantitative Maß

167 „Despite this progress (in theoretical and experimental work in 1986 and 1987), more extensive observations were still needed to resolve the competing explanations. A second, larger expedition beginning in August 1987 combined ground observations from several sites with aircraft flights into the hole. Flying out of southern Chile, a high-altitude research aircraft went directly into the depletion zone in the lower stratosphere, while a converted airliner carried additional instruments through the upper troposphere below the depletion region. This expedition found the hole to be larger and deeper than ever previously observed, and provided several key observations that allowed a rapid resolution of its cause. Most decisively, an extremely strong negative correlation was observed between ClO and ozone, with ClO suddenly rising from a few ppt to 1 ppb and ozone simultaneously falling by half or more at the moment the aircraft crossed the boundary of the depletion region. In addition, both total odd nitrogen and water were extremely low in the depletion region, and nitrate appeared to be incorporated into the PSCs as proposed. In contrast to ClO, BrO was observed at only a few ppt, significantly lower than had been theorized for the Br/Cl depletion mechanism. Finally, no evidence was found of sustained large-scale upwelling, the basic requirement of the exclusively dynamic explanations.” (Parson 2003:150f)

des interessierenden Phänomens. Außerdem haben spezifische theoretische Erklärungen oder bestimmte Phänomene als für den Ozonhaushalt wesentlich propagierende Wissenschaftler 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[168], 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 5 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.

168 „Uncertainties in the transport mechanisms of water across the tropical tropopause limit our ability to predict future changes in the stratosphere. Recent measurements over the Indian Ocean show unexpectedly low water concentrations and ultra-tin cirrus clouds, which may enhance water removal at the tropical tropopause. Such removal of water is difficult to understand in relation to the observed long-term increase in stratospheric water vapour, but raises the question to what degree ultra-thin cloud formation may affect lower stratospheric humidity, and thus stratospheric chemistry as a whole." EU-Commission (2001:134)

Tab. 7.1: Kennzeichen maßgeblicher wissenschaftlicher Kontroversen in verschiedenen Phasen der Ozonforschung

Phase / Kennzeichen	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
gesellschaftspolitische 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

8 Ozonforschung als Bestandteil der Atmosphärenforschung

Trotz eines Volumenanteils von nur 10-500 ppbv in der Troposphäre und 0.5-10 ppmv in der Stratosphäre hat das atmosphärische, überwiegend photochemisch gebildete Ozon eine zentrale Bedeutung (für den Menschen): durch seine häufig wichtige Rolle bei der Smogbildung (in Ballungsgebieten), durch seine Absorption von UV-Strahlung und durch seine wichtige Rolle bei der (über seine Photolyse und dabei entstehendem angeregten atomaren Sauerstoff $O(^1D)$ ablaufende) Bildung hochreaktiver, die troposphärische Chemie entscheidend bestimmender OH-Radikale.

Von ihren theoretischen Grundlagen gehört(e) die atmosphärische Ozonforschung, die (per definitionem) die Physik und Chemie des Ozons in der Atmosphäre untersucht, stets zur Atmosphärenforschung, die sich allgemein mit der Physik und Chemie der Atmosphäre befasst.

Hingegen erscheint es mir vor der den Forschungskontext dieser Studie bildenden Frage nach Wissenschaftsdynamik und Disziplinbildungsprozessen in der Klimaforschung wichtig festzuhalten, dass die Ozonforschung keinen genuinen Bestandteil der Klimaforschung darstellt, auch wenn es zu ihr vielfältige thematische Bezüge gibt und sie als erstes globale Umweltprobleme intensiv untersuchendes und gefördertes Forschungsgebiet mit zu deren aus ähnlichen Gründen forcierter sozialer Etablierung beigetragen haben mag. Die wesentlichen Berührungspunkte von Ozonforschung und Klimaforschung liegen (seit 1970) in ihrem auch konzeptionell vorrangigen Bezug auf anthropogene Einflüsse und deren Menschen betreffende Folgewirkungen, und in den zunehmend ins Blickfeld geratenden Ozon-Klima-Wechselwirkungen, worüber sowohl die Bedeutung des Klimas für den Ozonhaushalt als auch dessen Relevanz für das Klima zum Tragen kommen.

Diese auf kognitiver Ebene vorgenommene fachliche Einordnung der Ozonforschung wird durch nachfolgende begriffliche Abgrenzungen der für sie relevanten Fachgebiete noch etwas genauer begründet. Denn auf sozialer Ebene sind diese Unterscheidungen sehr viel weniger eindeutig, weil die Zuschreibung konkreter Forschungsvorhaben oder Veröffentlichungen zu Meteorologie, Atmosphärenforschung, Atmosphärenphysik, atmosphärischer Chemie, Klimaforschung gerade aufgrund ihrer zumeist problemorientierten Ausrichtung eine gewisse Willkür beinhaltet und (methodisch) von historisch kontingenten institutionellen Zugehörigkeiten abhängt.[169] Analytisch pointiert lassen sich diese Fachgebiete folgendermaßen beschreiben und unterscheiden:

Die Meteorologie befasst sich mit dem Zustand der Atmosphäre und dessen Ursachen und Veränderungen sowie den hieraus resultierenden Phänomenen, wie dem Wetter, die sie mithilfe von physikalischer Chemie, Strömungsphysik, Thermodynamik, Mikrophysik, Photophysik und -chemie erklärt.[170] Anthropogene Einflüsse können vorkommen, stehen aber konzeptionell nicht im Zentrum, eher hingegen für den Menschen relevante Phänomene wie Wettervorhersagen.

169 Entsprechend werden nicht nur Meteorologie und Atmosphärenforschung aus guten Gründen, sondern teils auch atmosphärische Umweltphysik und Umweltchemie in der Praxis als Synonyme angesehen (Feichter, Mitteilung 2005).

170 Im Prinzip sind auch nichtphysikalische und nichtchemische (theoretische) Erklärungen möglich, die es jedoch gegenüber den etablierten naturwissenschaftlichen Paradigmen schwer haben dürften und in der Praxis – außer als pragmatisch-technische Alltagserklärungen z.B. in Form unterstellter Kausalkorrelationen – keine Rolle spielen.

Die Atmosphärenforschung/Atmosphärenwissenschaften interessieren sich primär für die Zusammensetzung und Dynamik der Atmosphäre einschließlich großräumiger Phänomene. Es stehen mehr die physikalischen und chemischen Erklärungen und weniger die phänomenologischen Erscheinungen wie das Wetter im Vordergrund. Anthropogene Einflüsse interessieren, soweit sie hierbei von Bedeutung sind.

Atmosphärenphysik und atmosphärische Chemie befassen sich hierbei – als Bestandteile der Atmosphärenforschung – (per definitionem) insbesondere mit den physikalischen bzw. chemischen Aspekten und Erklärungen von Struktur und Dynamik der Atmosphäre.

Somit handelt es sich bei der Meteorologie und der Atmosphärenforschung um im Prinzip die gleichen Wissenschaftsgebiete, die sich allenfalls durch den stärkeren Anwendungsbezug (wie lokale Niederschlagsmessungen und Wettervorhersage) ersterer unterscheiden. In ihrer Unterscheidung kommt zudem auch die Differenz zwischen Wissenschaft und Forschung zum Tragen, insofern es auf der Ebene des sozialen Funktionssystems der *Wissenschaft* um (disziplinäres) wissenschaftliches, auf seinen durch die Unterscheidung von ‚wahr' und ‚nichtwahr' vorrangigen Geltungszusammenhang (context of justification) hin orientiertes, von nichtwissenschaftlichem Wissen unterscheidbares Wissen geht, während auf der Ebene von Organisationssystemen der (weder unbedingt disziplinär ausgerichteten noch durchweg wissenschaftliche Standards einhaltenden und gegenüber wissenschaftsexternen Einflüssen offeneren) *Forschung* der Entstehungszusammenhang (context of discovery) der Herstellung gültigen Wissens als Untersuchungs- und Entscheidungsprozess im Vordergrund steht (vgl. Halfmann/Schützenmeister 2002).

Die Klimaforschung befasst sich mit der Entwicklung des Klimas, die primär, aber nicht nur in der Atmosphäre verankert ist. Hierbei interessieren vor allem anthropogene Einflüsse, die als Störungen natürliche, gleichfalls untersuchte Konstanten und Schwankungen überlagern und möglicherweise verändern, sowie für den Menschen relevante Folgen von Klimaveränderungen. Es geht dabei primär um langfristig wirksame Makrophänomene. Insofern handelt es sich dabei im Prinzip größtenteils um Atmosphärenforschung, erweitert um nichtatmosphärische Anteile und Kopplungen (vgl. exemplarisch Houghton et al 2001, Watson et al 2001).[171]

Die vorgenommene Zuordnung der Ozonforschung zur Atmosphärenforschung und nicht – wie auch möglich – zur Meteorologie ergibt sich danach lediglich aus ihrer primären Ausrichtung auf genuine Forschung, der es vor allem um das grundlegende wissenschaftliche Verständnis spezifischer, als soziale Probleme perzipierter Phänomene (Ozonabbau) ohne direkten Anwendungsbezug und disziplinäre Einordnung ging.[172] Denn grundsätzlich ließe sich ebenso auch die Klimaforschung als Gebiet der Meteorologie klassifizieren, wie ihre nachfolgende Lehrbuch-Darstellung nahe legt.

„Die Meteorologie zählt zum Kreis der Geowissenschaften, also jener Wissenschaften, deren Forschungsgegenstand die Erde ist. Weitere Mitglieder dieser Familie sind die Geologie, Geophysik, Ozeanographie, Geographie. Im engeren Sinne ist die Meteorologie eine geophysikalische Wis-

171 Gegenüber der Klimatologie unterscheidet sie sich durch ihren Fokus auf anthropogen bedingte Klimaveränderungen. Die Klimatologie befasst sich 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 (Klimamodelle)." (Malberg 1994:3)

172 Eine Zuordnung zur Meteorologie liegt deshalb nicht nahe, weil (kürzerfristige) Wetterphänomene in der Ozonforschung nicht interessieren und es ihr um einen spezifischen Stoff, Ozon, geht, der aus meteorologischer Sicht nur ein Aspekt unter vielen sein kann.

senschaft, denn sie beschäftigt sich mit den physikalischen Eigenschaften der Lufthülle des Planeten Erde, unserer Atmosphäre.[173] Weitere Zweige der Geophysik befassen sich mit den Eigenschaften der festen Erde, so z.B. die Erdbebenkunde (Seismik), oder mit den physikalischen Eigenschaften der Ozeane und Gewässer... Grundlage [der Meteorologie] ist die Wetterbeobachtung und die Auswertung jahrzehnte- bis jahrhundertelanger Beobachtungsreihen mit dem Ziel, die physikalischen Gesetzmäßigkeiten zu erkennen, nach denen die Vorgänge in der Atmosphäre ablaufen. In diesem Sinne gehört die Meteorologie zur Physik, betreibt sie die Physik der Atmosphäre, ist der Meteorologe als ‚angewandter' Physiker zu betrachten. In jüngster Zeit hat auch die Luftchemie eine zunehmende Bedeutung erlangt, z.B. bei Fragestellungen über chemische Prozesse bei Wetterlagen mit hoher Luftbelastung, also bei schwefligem oder bei photochemischem (Ozon-)Smog." (Malberg 1994:1) Betrachtet man verschiedene Teilbereiche der Meteorologie, so lassen sich zwei Ebenen unterscheiden: „(1) die wissenschaftlichen Grundlagenbereiche Experimentelle Meteorologie, Theoretische Meteorologie, Synoptische Meteorologie, Luftchemie und Klimatologie, (2) die angewandten Fachrichtungen Wettervorhersage, Technische Meteorologie, Verkehrsmeteorologie, Bio- und Agrarmeteorologie, Meteorologie der Luftverunreinigungen und Hydrometeorologie." (Malberg 1994:1f) Nach dieser Definition decken Experimentelle Meteorologie, Theoretische Meteorologie und Luftchemie weitgehend die Ozonforschung und Klimatologie, Experimentelle Meteorologie, Theoretische Meteorologie, Synoptische Meteorologie, Hydrometeorologie und Biometeorologie weitgehend die Klimaforschung ab.[174]

9 Wissenschaftssoziologische Ergebnisse und Schlussfolgerungen

In diesem Kapitel geht es darum, die Quintessenz aus der bisherigen Darstellung und Analyse im Hinblick auf die Wirksamkeit und Eindeutigkeit disziplinärer Verankerungen der problemorientierten Ozonforschung zu ziehen und entsprechende wissenschaftssoziologische Befunde und Schlussfolgerungen zu präsentieren.

Zunächst sei nochmals festgehalten, dass die Ozonforschung einerseits genuin auf das theoretische Verständnis des atmosphärischen, insbesondere stratosphärischen Ozonhaushalts abzielt, u.a. weil Ozon in der Stratosphäre (auch unabhängig von anthropogenen Bezügen) eine Schlüssel-

173 Genuine Geophysiker würden die Meteorologie deshalb nicht zur Geophysik zählen.

174 „Die Experimentelle Meteorologie beschäftigt sich mit den meteorologischen Messmethoden... zur speziellen Anwendung bei der Erfassung der atmosphärischen Zustände wie bei deren Simulation im Labor... Die Theoretische Meteorologie befasst sich mit der physikalisch-mathematischen Beschreibung und Vorausberechnung der Bewegungsvorgänge in der Atmosphäre einschließlich der energetischen Prozesse... Die Synoptische Meteorologie beschäftigt sich mit der Diagnose der großräumigen Verteilung der atmosphärischen Zustandsgrößen Luftdruck, Wind, Temperatur, Feuchte und deren Auswirkung auf die lokalen und regionalen Wettererscheinungen... Die Luftchemie befasst sich mit chemischen Reaktionen in der Atmosphäre. Die beteiligten Gase können aus natürlichen Quellen, z.B. Vulkanen, stammen oder anthropogen, also durch den Menschen freigesetzt sein. ‚Ozonsmog' und ‚Ozonloch' sowie saurer Regen sind Beispiele für chemische Reaktionen in unserer Atmosphäre... Aufgabe der Bio- und Agrarmeteorologie ist es, die Wechselwirkung zwischen Biosphäre und Atmosphäre zu untersuchen... Die Hydrometeorologie befasst sich mit dem Kreislauf des Wassers in der Atmosphäre, d.h. mit Verdunstung, Wasserdampftransport und Niederschlag." (Malberg 1994:2f)

rolle innehat, und andererseits vorrangig die anthropogen verursachten und gesellschaftlich relevanten Mechanismen des Abbaus (und der Regeneration) der stratosphärischen Ozonschicht untersucht und damit eine spezielle, problembezogene Fokussierung vornimmt.[175] Im Kontext des gesellschaftspolitisch und nicht wissenschaftsintern definierten Ozonproblems sind darüber neben anderen, primär bodennahes Ozon und Ozonsmog analysierenden Segmenten der Ozonforschung nicht genuin der Ozonforschung zuzurechnende Analysen von FCKW-Substituten, UV-Strahlung und ihren Wirkungen anzuführen, die auf kognitiver Ebene als hiervon theoretisch separate Forschungsgebiete einzuordnen sind, die aber sozial (im öffentlichen Diskurs) teils mit der atmosphärischen Ozonforschung verknüpft werden.

Die analytische Unterscheidung von wissenschaftlichen, technischen und praktischen Problemen[176] (vgl. Ravetz 1973, Conrad 1980) macht deutlich, welche Bedingungen inter-disziplinäre Forschung erfordern und warum problem- und anwendungsbezogene Forschung auch (verstärkt) durch soziale, politische und ökonomische Kriterien bestimmt wird, ohne dass Wissenschaft dadurch zu einer Mixtur dieser unterschiedlichen Rationalitäten wird.[177] Trotz der Zunahme problemorientierter Forschung, die neben wissenschaftlichen notwendig auch außerwissenschaftliche Kriterien zu beachten hat, bleiben somit die Wissenschaft und damit die sie primär konstituierenden Disziplinen auch in einer sich verwissenschaftlichenden Gesellschaft weiterhin für wissenschaftliche Wahrheiten zuständig.

Aus diesem Blickwinkel markieren drei (den beschriebenen Phasen 3, 4 und 5+6 korrespondierenden) Perioden die Entwicklung der (stratosphärischen) Ozonforschung seit ihrer theoretischen Fundierung durch die Photochemie in 1930.

---

175 Die politisch brisante FCKW-Ozon-Hypothese stellt nur eine von mehreren Ozon-Abbauprozessen und nicht den Kern der Ozondynamik in der Stratosphäre dar.

176 „Wissenschaftliche Problemlösung hat, grob gesprochen, die Feststellung neuer Eigenschaften von Untersuchungsgegenständen und letztlich das Zustandebringen von Erkenntnis, die Konstruktion von Fakten (im von Ravetz definierten Sinne), das Auffinden von generalisierten Wahrheiten 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 sehr genau mögliche Beiträge der Problemlösung fest. Es geht weniger um generalisierte Wahrheit, sondern um erfolgreiches Funktionieren. 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 etc. 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. Dementsprechend leidet die Arbeit an der Lösung praktischer Probleme, im Gegensatz etwa zu technischen Problemen, darunter, dass es keine allgemeine Übereinstimmung über die Kriterien geben kann, nach denen die Qualität oder der Erfolg beurteilt werden sollen. Interessenlagen, Wertvorstellungen, Nutzen, Kosten, Entscheidungsbefugnisse der von dem praktischen Problem betroffenen Menschen unterscheiden sich im Allgemeinen. Bei Situationen, in denen Übereinstimmung über die Ziele besteht und es zur Zusammenarbeit bei der Durchführung kommt, entsteht erst gar kein praktisches Problem in größerem Umfang, und die gesellschaftliche Aufgabe wird gelöst, ohne erst viel Aufmerksamkeit zu erregen.“ (Conrad 1980:4f)

177 „Reference to heterogeneous codes or patterns of rationality is an essential part of the social reality of doing science... However, this does not render science a mixture of all rationalities.” (Krohn/Daele 1998:199)

1. Bis ca. 1970 ging es in der Ozonforschung vor allem um ein wissenschaftliches Problem: eine akademisch orientierte Forschung bemühte sich auf vergleichsweise klaren theoretischen Grundlagen von Photochemie und Dynamik um die korrekte (formale) Beschreibung der (naturgegebenen) räumlichen und zeitlichen Strukturen des Ozonhaushalts, die die Suche nach innovativen Messverfahren einschloss, und die sich aufgrund vermehrter Diskrepanzen zwischen theoretisch postulierten und empirisch gemessenen Ozonwerten mit dem Rätsel fehlender Ozonsenken befassen musste. Währenddessen existierten kein signifikantes wissenschaftsexternes Interesse und daraus resultierende Bemühungen, diese Forschung zu beeinflussen.
2. Ungefähr von 1970 bis 1988 stand in der Ozonforschung das praktische Problem eines anthropogen verursachten Ozonabbaus im Vordergrund: die Ozonforschung wies eindeutige Merkmale problemorientierter Forschung auf und sah sich im Konflikt zwischen Regulierungs- und Wirtschaftsinteressen massiven Einflussversuchen ausgesetzt. Dies resultierte insbesondere aus dem Zusammenspiel folgender Faktoren: ohne problembezogene Kooperation der unterschiedliche theoretische Erklärungsperspektiven einnehmenden Ozonforscher standen konkurrierende disziplinäre Erklärungsangebote im Raum, sodass die Wissenschaft zu keiner autoritativen Abgrenzung in der Lage war; aufgrund der gesellschaftspolitischen Einbettung der Kontroverse um das Ozonproblem kam es zur interessegeleiteten Verknüpfung und Vermischung wissenschaftlicher und nichtwissenschaftlicher Argumente und Vorgehensweisen; die verfügbaren Mess- und Labordaten ergaben über ein Jahrzehnt kein eindeutiges Bild und ließen daher lange Zeit keine empirisch begründete Schließung der Kontroverse zu.
3. Nach ihrer Schließung durch entscheidende Experimente und Messergebnisse wandelte sich das praktische Problem des Ozonabbaus tendenziell in ein technisches: die Ozonforschung hatte auf der Basis eines inner- und außerwissenschaftlich akzeptierten Grundverständnisses des Ozonabbaus, das sich in der zweiten Hälfte der 1980er Jahre zur dominanten Erklärung herausbildete, und einer klaren generellen Problemlösungsorientierung, deren politische Umsetzung im Ozonregime im Einzelnen ausgehandelt wurde, im Rahmen (extern induzierter) umfangreicher wissenschaftlicher Kooperation substanzielle problemorientierte Forschung zwecks Aufklärung der Zusammenhänge zu leisten. Entsprechend spielten (wissenschaftliche) Kontroversen nur mehr eine untergeordnete Rolle. Wissenschaftsexterne Einflüsse kamen über politisch gewollte Forschungsprogramme zum Tragen. Eine derartige Forschungssteuerung trug maßgeblich zu einer vorgegebenen Problemorientierung der Ozonforschung bei, einschließlich ihrer möglichen Präferenz für bestimmte (als vorteilhaft angesehene) Vorgehensweisen, wie insbesondere die problembezogene Kooperation von Disziplinen (Chemie, Dynamik, Strahlung, Mikrophysik) und Analyseebenen (Laborexperimente, koordinierte Messkampagnen, Modellbildung), ohne aber (ab 1988) auf Theoriebildung oder Messergebnisse Einfluss nehmen zu wollen. Diese werden durch die Ozonforschung selbst bestimmt, die sich wie in Kapitel 4 beschrieben als finalisierte, aber gegenüber externen inhaltlichen Steuerungsversuchen (schon aus Glaubwürdigkeitsproblemen) resistente Forschung interpretieren lässt (vgl. Böhme et al. 1978, Daele/Krohn 1975, Daele/Weingart 1975, Daele et al. 1979, Halfmann 1980, Krohn 1979, Krohn/Daele 1998, Krohn/Küppers 1989, Weingart 1976).

Auf sozialer Ebene war die Zahl der Ozonforscher während der akademischen Phase der Ozonforschung nur knapp groß genug, um eine specialty bilden zu können. Seit ihrer Problemorientierung gilt dies zweifellos, wobei die Zahl der Fachpublikationen ab 1990 massiv anstieg (vgl. Grundmann 1999:94). Der Kommunikationszusammenhang einer specialty war in der Ozonforschung jedoch

nur eingeschränkt gegeben, weil sich die beteiligten Wissenschaftler bei ihren Arbeiten primär an ihrem disziplinären Theoriezusammenhang und/oder ihrer Analyseebene orientierten.[178] Allenfalls lässt sich ab ca. 1990 von einer specialty der Ozonforscher sprechen, die in starkem Ausmaß durch die von der Forschungspolitik aufgelegten Ozonforschungsprogramme erzwungen wurde. Aber auch danach sind die Ozonforscher vor allem Atmosphärenforscher mit unterschiedlichen Schwerpunkten, insofern die mit ihrer Arbeit verbundene Spezialisierung auf kognitiver Ebene umso nachrangiger wird[179], je mehr die Forschungsfragen der Ozonforschung (im Rahmen spezifischer Wechselwirkungen) die (physikalische und chemische) Einbettung und Bestimmung des Ozonhaushalts durch generelle atmosphärische Prozesse und Strukturen betreffen.

Wie in anderen sich neu formierenden problemorientierten Forschungsgebieten kamen innovative Entwicklungen in den 1970er Jahren eher von den Rändern der etablierten Wissenschaft, denn es ist ein riskantes Unterfangen, Forschung jenseits spezialisierter ‚business as usual' Vorhaben zu betreiben, um wissenschaftliche Reputation zu erlangen. So war Crutzens Entdeckung in 1970, dass Stickoxide die Ozonschicht angreifen können, „die erste wissenschaftliche Revolution auf dem Gebiet der stratosphärischen Chemie nach vier Jahrzehnten theoretischer Stagnation."[180] (Grundmann 1999:104)

Generell kamen in der Ozonforschung die wissenschaftssoziologisch bekannten, eine (öffentliche Aufmerksamkeit erreichende) problemorientierte wissenschaftliche Forschung prägenden sozialen Mechanismen zum Tragen, deren genauere Darstellung sich etwa in Grundmann (1999) findet: Skeptizismus und Vertrauen, implizites Wissen, Konkurrenz und Kooperation, Profilierung und Prioritätskonflikte[181], Fähigkeit der Verbindung unterschiedlicher Analyseebenen und theoretischer Perspektiven[182], Internationalisierung, Purifizierung und fallbezogen begrenztes (unterschiedliches) öffentliches Engagement[183], symbolische Aufbereitung

Entscheidende Strukturmerkmale problemorientierter Ozonforschung und ihrer disziplinären Verankerungen lassen sich nun abschließend wie folgt resümieren:

178 Wie teilweise in Grundmann (1999, 2001) beschrieben, betrachteten sich Chemiker und Dynamiker bis 1988 vorwiegend als unabhängig voneinander arbeitende, miteinander um überlegenere (paradigmatische) theoretische Erklärungen konkurrierende Wissenschaftler, befassten sich die meisten Modellierer innerhalb ihrer specialty von Atmosphären- und Klimamodellierung vor allem deshalb mit Ozon, weil hierfür in größerem Umfang Fördermittel bereitgestellt wurden, und konkurrierten die im weltweiten Dobson-Netzwerk von Bodenstationen Messungen vornehmenden Wissenschaftler mit den Satellitendaten erhebenden Forschern um die Überlegenheit ihrer jeweiligen Messmethoden.

179 Es geht dann beispielsweise um die Effekte des Solarzyklus auf verschiedene atmosphärische Schichten oder Stoffklassen oder um die Rolle der Tropopause bei Troposphäre-Stratosphäre-Interaktionen, wobei die jeweiligen Auswirkungen auf das Ozonbudget lediglich eine spezielle unter mehreren Forschungsfragen bildet.

180 „Paul Crutzen ist ein ehemaliger Ingenieur und Meteorologe und ein Autodidakt auf dem Gebiet der Chemie. Er promovierte 1968 in Meteorologie." (Grundmann 1999:104)

181 So versuchte McElroy seine Position und Reputation über strategisches Publikations- und Gutachterverhalten und die gezielte Priorisierung von Brom gegenüber Chlor als ozonschädigende Substanz zu stärken (vgl. Grundmann 1999:126ff).

182 „Rowland verbindet solch disparate Spezialisierungen und Fähigkeiten wie Laborkinetik, Modellrechnungen und In-situ-Messungen." (Grundmann 1999:103)

183 Ohne (freundliche) Distanzierung gegenüber umweltpolitischen Akteuren und „durch zu starkes öffentliches Engagement leidet die wissenschaftliche Glaubwürdigkeit." (Grundmann 1999:184)

1. Für die zuvor eher akademisch geprägte stratosphärische Ozonforschung wurde nach 1970 ein sozial definiertes praktisches Problem, nämlich das Risiko eines anthropogen verursachten Ozonabbaus, Hauptbezugspunkt, das aber – nach Schließung einer inner- und außerwissenschaftlich brisanten, gesellschaftspolitisch eingebetteten wissenschaftlichen Kontroverse durch entscheidende Experimente und autoritative Assessments – ab 1988 als tendenziell technisches Problem – zumindest für den atmosphärischen Ozonbereich – wissenschaftlich separat (und grundlagenorientiert) behandelt werden konnte, ohne dass sich die Ozonforschung, auch weil ihr Objektbereich keine direkten normativen sozialen Bezüge aufweist, weiterhin mit dauernden Interferenzen durch nichtwissenschaftliche Interessen und Kriterien konfrontiert sah, wie dies für andere praktische Probleme wie bei Gesundheit, Armut oder Arbeitslosigkeit der Fall ist. Im Übrigen treffen die etwa von Böhme et al. (1978), Daele et al. (1979) und Weingart (2001) beschriebenen Kennzeichen einer problemorientierten, mehr oder weniger finalisierten Forschung zu.
2. Die als hinreichend angesehene Erklärung eines konkreten (sozial definierten) Phänomens wie z.B. des Ozonlochs erfolgt durch eine typisch problemorientierte Kombination verschiedener wissenschaftlicher Theorien (unterschiedlicher disziplinärer Provenienz), die fallorientiert ihre jeweiligen, häufig verschiedene Teilbereiche betreffende Erklärungen (in einem Gesamtmodell) zusammenfügen: Diffusion und Transport von FCKW in die Stratosphäre, vorherrschende Ozonreaktionen und -zirkulation in der Stratosphäre, vermehrter Ozonabbau durch Chlor- und andere Radikale, Veränderungen erdnaher UV-B Strahlung, UV-Strahlung erzeugt Hautkrebs und schädigt die Biosphäre. Diese modellhafte Kopplung von Theorien zur Erklärung ihres konkreten (sozial definierten) Untersuchungsgegenstands ist kennzeichnend für problemorientierte Forschung und unvermeidbar notwendig.
3. Es bestand von daher keine wirkliche specialty der Ozonforscher; vielmehr entwickelte sich eine extern forcierte, problembezogene Zusammenarbeit unterschiedlicher fachlicher und ebenenbezogener Richtungen (Chemie, Dynamik, Mikrophysik; Modellbildung, Laborchemie/Reaktionsraten, Messplattformen und -instrumente). Diese implizierte keine Auflösung kognitiv bestimmter disziplinärer Grenzen und Verankerungen, wohl aber eine fallbezogene Gruppenbildung von aus unterschiedlichen wissenschaftlichen und institutionellen Gründen/Problemen (z.B. Bau von Überschallflugzeugen, Challenger-Explosion) zu Ozonforschern gewordenen Wissenschaftlern, wobei in diesem Prozess nichtwissenschaftliche Akteure und Sichtweisen (gerade deshalb) eine bedeutsame Rolle spielten (vgl. Canan/Reichman 2002, Grundmann 1999, Lambright 2005, Liftin 1994, Roan 1990).
4. Der externe politische Druck zur problemorientierten Kooperation von Ozonforschern zwecks Klärung und Lösung eines Problems (UV-Strahlungseffekte) auf politischer Ebene (und nicht nur zwecks Durchsetzung einer davon trennbaren spezifischen politischen Position bzw. eines bestimmten Interesses) hatte die positive Wirkung, dass die zuvor getrennt arbeitenden und primär ihre je eigene (disziplinäre) Perspektive vertretenden Forschungsrichtungen als auch Arbeitsbereiche (zumindest ansatzweise) problemorientiert zusammenarbeiten mussten. Dadurch wurden zum einen unterschiedliche Messstationen abgeglichen und standardisiert, wurden Laborexperimente, Feldmessungen, Modellierung und Theoriebildung koordiniert, und arbeiteten Dynamiker und Chemiker nicht gegeneinander sondern in sich wechselseitig ergänzender Weise, um eine problembezogene wissenschaftliche Klärung des Ozonproblems zu erreichen, die mehr von politischem als von wissenschaftlichem Interesse war. Zum anderen wurden weitere problembezogen relevante Bereiche (FCKW-Substitute, UV-Strahlung und ihre Effekte), die auf theoretischer und Phänomenebene kaum etwas miteinander zu tun hatten, gleichfalls intensiv bearbeitet und auf sozialer Ebene (Assessments) verknüpft. Es wurden also kognitiv begründete, wissenschaftsintern bestehende soziale Abgrenzungen und Ausblen-

dungen problembezogen überwunden bis hin zu problembezogener Gesamterklärung/Theoriebildung, wobei eine solche eher dort zustande kam und eine Rolle spielt, wo es um die Erklärung desselben konkreten Phänomens ging (z.B. des Ozonlochs), während sonst lediglich Bezugnahmen ohne theoriebezogene Verknüpfung – etwa in Form von in die jeweiligen Erklärungsmodule eingehenden, externen Randbedingungen – vorkamen (Ozonabbau, vermehrte UV-Strahlung), da eine solche aufgrund bestehender disziplinärer/theoretischer Traditionen nicht möglich war.[184]

5. Ebenso trug diese problemorientierte Kooperation (implizit) dazu bei, den Einfluss bestimmter gesellschaftspolitisch interessierter, in ihrer Darstellung immerhin pseudowissenschaftlich/rational aufgebauter Problemdeutungen, deren Durchschlagskraft vom Ausmaß der ungeklärten wissenschaftlichen Fragestellungen abhängt, durch mit beträchtlichen Anstrengungen und kooperativen Schließungsprozessen verbundene autoritative scientific Assessments zurückzudrängen (vgl. Parson 2003). Diese Assessments sind jedoch abhängig von messtechnisch abgesicherten, eindeutigen empirischen Messungen und diese widerspruchsfrei theoretisch erklärenden Konzepten, die zu entsprechenden Modellergebnissen führen. Beispielhaft genannt seien die theoretische Beschreibung und Modellierung heterogener Reaktionen an PSC-Teilchen bei gleichzeitiger Berücksichtigung von deren lokaler Dynamik und Sedimentation, oder die gesamthafte Modellierung homogener und heterogener Reaktionen in mittleren Breiten einschließlich der modellinternen Berücksichtigung naturbedingter Variationen (Solarzyklus, planetare Wellen, Vulkane). Idealiter geht es dabei um die Erklärung komplex strukturierter Phänomene durch wenige in mathematischen Modellen integrierte (physikalische und chemische) Theorien.

6. Für die (auch außerwissenschaftliche) soziale Relevanz dieser Assessments spielen die Qualität der Messverfahren und die Zuverlässigkeit der Messdaten eine entscheidende Rolle, die zu guter Letzt erst durch in jahrzehntelanger Forschungs- und Entwicklungsarbeit entwickelte Theorien und Messinstrumente gewährleistet werden konnten.[185] Der hierfür notwendige Schub resultierte aus einer Kombination inner- und außerwissenschaftlicher Interessen an durch geeignete Messverfahren hinreichend abgesichertem Wissen über die Rolle von Ozon in atmosphärischen Prozessen. „Thus, scientific curiosity about ozone led researchers to improve their tools for measuring and monitoring its concentration in the atmosphere. However, practical imperatives of weather forecasting, national security, and emerging environmental problems expanded interest in ozone measurement and tended to be even stronger drivers of research." (Farrell 2005:73)

7. Das Beispiel der Ozonforschung bestätigt, dass mit wachsender Komplexität ihres Gegenstandsbereichs[186] (gerade in problemorientierter multidisziplinärer Forschung) ein zunehmender trade-off zwischen Vorhersagegenauigkeit und Vollständigkeit disziplinärer Theorien zu erwarten ist. „Complex problem definitions, which take account of the real conditions that prevail in

184 Ob sie auch aus prinzipiellen kognitiven Gründen keinen Sinn machen würde, kann hier offen bleiben.

185 „By the late nineteenth century, atmospheric scientists had evidence that an ozone layer existed in the upper atmosphere and, by the 1930s, had a rough idea of its altitude and size and knew that it was created by solar radiation. However, an accurate, quantitative understanding of the ozone layer did not emerge until the mid-1980s, after sudden concern about its possible depletion rapidly accelerated research. In the case of ozone's role in photochemical smog, it took about a decade of research, starting in the 1940s, to discover that ozone even played a role and then another forty years to develop an accurate, quantitative understanding of this phenomenon. A more recent concern, the role of ozone in climate change, is still being worked out." (Farrell 2005:73)

186 Dies trifft für die troposphärische Ozonforschung umso mehr zu.

the innovation process, may only allow theory formation which resembles less the paradigms of natural science disciplines and more the conceptual schemes developed in the social sciences. Theoretical understanding will then provide a framework for the assessment and reflection of problems and options, and only to a limited extent the predictions and techniques of manipulating outcomes." (Krohn/Daele 1998:195)

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

10 Literaturverzeichnis

Andersen, S, Sarma, M, 2002: Protecting the Ozone Layer: The United Nations History. London: Earthscan

Andersen, S. et al, 1997: Champions of the World: Stratospheric Ozone Protection Awards. Washington DC: US EPA

Anderson, J, 1976: The absolute concentration of OH (X2Pi) in the earth's stratosphere, Geophysical Research Letters 3: 165-168

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

Andreae, M. et al, 2002: Globaler Wandel, Atmosphärenchemie und die Biosphäre – Rückkopplungen und Wechselwirkungen, in: W. Hauser (Hg), Klima. Das Experiment mit dem Planeten Erde. München: Deutsches Museum und Münchener Rückversicherungsgesellschaft

Angell, J, Korshover, J, 1973: Quasi-biennial and long-term fluctuations in total ozone, Monthly Weather Review 101: 426-443

Atkinson, R. et al, 1989: Towards a quantitative understanding of atmospheric ozone, Planet. Space. Sci. 15: 1605-1620

Bates, D, Nicolet, M, 1950a: The photochemistry of atmospheric water vapor, Journal of Geophysical Research 55: 301-327

Bates, D, Nicolet, M, 1950b: Atmospheric hydrogen, Publ. Astron. Soc. Pac. 62: 106-110

Benedick; R, 1991: Ozone Diplomacy. Cambridge: Harvard University Press

Benedick, R, 1997: Global Climate Change. The International Response. WZB FS II 97-401, Berlin

Benedick, R, 1998: Das fragwürdige Kyoto-Klimaprotokoll. Unbeachtete Lehren aus der Ozongeschichte. WZB FS II 98-407, Berlin

BMBF, 1990: Ozonforschungsprogramm. Bonn

BMBF (Hg), 2000: 10 Jahre Deutsche Ozonforschung 1989-1999. Worms: Verlag für Marketing und Kommunikation

BMBF, 2004: Bundesbericht Forschung 2004. Bonn

Böhme, G. et al, 1978: Die gesellschaftliche Orientierung des wissenschaftlichen Fortschritts. Frankfurt: Suhrkamp

Bojkov, R.D, 1986: Surface ozone in the second half of the nineteenth century, J. Clim. Appl. Meteorol. 25: 343-352

Böschen, S, 2000: Risikogenese. Opladen: Leske + Budrich

Brack, D, 1996: International Trade and the Montreal Protocol. London: Earchscan

Brasseur, G, 1987 : The endangered ozone layer, Environment 29 (1): 6-11, 39-45

Brasseur, G. et al. (Hg), 1999 : Atmospheric Chemistry and Global Change. New York: Oxford University Press

Brewer, A, 1949: Evidence for a world circulation provided by the measurements of helium and water vapour distributions in the stratosphere, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 75: 351-363

Brönnimann, S. et al, 2003a: Total ozone observations prior to the IGY. I: A history, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 129: 2797-2817

Brönnimann, S. et al, 2003b: Total ozone observations prior to the IGY. II: Data and quality, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 129: 2819-2843

Burns, D.T, 1997: Early problems in the analysis and the determination of ozone, Fresenius Journal of Analytical Chemistry 357: 178-183

Cagin, S, Dray, P, 1993: Between Earth and Sky: How CFCs Changed our World and Endangered the Ozone Layer. New York: Pantheon

Canan, P, Reichman, N, 2002: Ozone Connections: Expert Networks in Global Environmental Governance. Sheffield: Greenleaf Publishing

Chameides, W, Walker, J, 1973: A photochemical theory of tropospheric ozone, Journal of Geophysical Research 78: 8751-8760

Chapman, S, 1930a: A theory of upper-atmospheric ozone, Memoranda of the Royal Meteorological Society 3: 103-125

Chapman, S, 1930b: On ozone and atomic oxygen in the upper atmosphere, Philos. Mag. 10: 369-383

Christie, M, 2000: The Ozone Layer. A Philosophy of Science Perspective. Cambridge: Cambridge University Press

Chubin, D, 1976: The Conceptualization of Scientific Specialities, the Sociological Quarterly 17: 448-476

Chubachi, S, 1984: A special ozone observation at Syowa station, Antarctica, from February 1982 to January 1983, in: C. Zerefos, A. Ghazi (Hg), Atmospheric Ozone. Dordrecht: Reidel

Cicerone, R.J. et al, 1973: Assessment of Possible Environmental Effects of Space Shuttle Operations. NASA CR-129003. Washington DC: NASA

Cicerone, R.J. et al, 1974: Stratospheric ozone destruction by man-made chlorofluoromethanes, Science 185: 1165-1166

Clark,W, Munn, R. (Hg), 1986: Sustainable Development of the Biosphere. Cambridge: Cambridge University Press

Clark, W./The Social Learning Group, 2001: Learning to Manage Global Environmental Risks. Cambridge: MIT Press

Clemitshaw, K.C, 2004: A review of instrumentation and measurement techniques for ground-based and airborne field studies of gas-phase tropospheric chemistry, Critic. Rev. Environ. Sci. Technol. 34 (1): 1-108

Collins, H, 1985: Changing Order. London: Sage

Conrad, J, 1980: Bürgerinitiativen und wissenschaftliche Expertise. Strukturveränderungen der Wissenschaft durch die Kernenergiedebatte? Ms. 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, 2002: Limitations to interdisciplinarity in problem oriented social science research, The Journal of Transdisciplinary Environmental Studies 1 (1): 55-69

Conrad, J, 2005: Analytisches Gerüst für die Einordnung von (empirischen) Tatbeständen in Bezug auf Forschungsergebnisse und Erklärungsmodelle der Klimaforschung zur Klärung der Frage nach daraus resultierenden Disziplinbildungsprozessen. Ms, Berlin

Conrad, J, 2007: Wissenschaftsdynamik, Community- und Disziplinbildungsprozesse in der Klimaforschung. Projektbericht, Berlin

Conrad, J, 2008: Von Arrhenius zum IPCC. Wissenschaftliche Dynamik und disziplinäre Verankerungen der Klimaforschung. Münster: Monsenstein und Vannerdat

Cook, E, 1996: Ozone Protection in the United States: Elements of Success. Washington DC: World Resources Institute

Crutzen, P, 1970: The influence of nitrogen oxides on the atmospheric ozone content, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 96: 320-325

Crutzen, P, 1971: Ozone production rates in an oxygen, hydrogen, nitrogen-oxide atmosphere, Journal of Geophysical Research 76: 7311-7327

Crutzen, P, 1973: A discussion of the chemistry of some minor constituents in the stratosphere and troposphere, Pure and Applied Geophysics 106-108: 1385-1399

Crutzen, P, 1974: A review of upper atmospheric photochemistry, Canadian Journal of Chemistry 52: 1569-1581

Crutzen, P, 1988: Tropospheric Ozone: An Overview, in: I.S. Isaksen (Hg), Tropospheric Ozone: Regional and global Scale Interactions. Dordrecht: Reidel

Crutzen, P, 1996: Mein Leben mit O3, Nox und anderen YZOx-Verbindungen (Nobel-Vortrag), Angewandte Chemie 108: 1878-1898

Crutzen, P, 1999: Tropospheric Ozone, in: G. Brasseur et al. (Hg), 1999: Atmospheric Chemistry and Global Change. New York: Oxford University Press

Crutzen, P, Arnold, F, 1986: Nitric acid cloud formation in the cold Antarctic stratosphere: a major cause for the springtime ‘ozone hole’, Nature 324: 651-655

Crutzen, P, Ramanathan, V, 2000: The ascent of atmospheric sciences, Science 290: 299-304

Crutzen, P. et al, 1975: Solar proton events: stratospheric sources of nitric oxide, Science 189: 457-459

Daele, W. van den, 1996: Objektives Wissen als politische Ressource: Experten und Gegenexperten im Diskurs, in: W. van den Dale, F. Neidhardt (Hg), Kommunikation und Entscheidung. Politische Funktionen öffentlicher Meinungsbildung und diskursiver Verfahren. WZB-Jahrbuch 1996. Berlin: edition sigma

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

Dobson, G, 1956: Origin and distribution of polyatomic molecules in the atmosphere, Proceedings of the Royal Society A236: 187-193

Dobson, G, 1968: 40 years research on atmospheric ozone at Oxford – a history, Appl. Opt. 7 (3): 387-405

Dobson, G, 1973: The development of instruments for measuring atmospheric ozone during the last 50 years, J. Phys E 6 (10): 938-939

Dobson, G, With, F, 1930: Observations of the amount of ozone in the Earth’s atmosphere and its relation to other geophysical conditions. Part IV, Proceedings of the Royal Society, A129: 411-433

Dobson, G. et al, 1927: Observations of the amount of ozone in the Earth’s atmosphere and its relation to other geophysical conditions. Part II, Proceedings of the Royal Society, A114: 521-541

Dobson, G. et al, 1946: Meteorology of the lower stratosphere, Proceedings of the Royal Society A185 (1001): 144-175

Dotto, L, Schiff, H, 1978: The Ozone War. Barden City, NY: Doubleday & Co

Ehmert, A, 1949: Ein einfaches Verfahren zur Messung kleinster Jod- und Natriumthiosulfatmengen in Lösungen, Zeitschrift für Naturforschung 4b: 321-327

EU-Commission, 2001: European Research in the Stratosphere 1996 – 2000. Advances in our understanding of the ozone layer during THESEO. EUR 19867, Brüssel

Fabry, C, Buisson, H, 1913: L’absorption de l’ultra-violet par l’ozone et la limite du spectre solaire, Journal de Physique 3 (5): 196-206

Farman, J. et al, 1985: Large losses of total ozone in Antarctic reveal seasonal ClOx/NOx interaction, Nature 315: 207-210

Farrell, A, 2005: Learning to see the invisible: discovery and measurement of ozone, Environmental Monitoring and Assessment 106: 59-80

Feister, U, 1990: Ozon – Sonnenbrille der Erde. Thun: Harri Deutsch

Findlay, G, 1928: Ultra-violet light and skin cancer, The Lancet 215: 1070-1073

Fioletov, V. et al, 2002: Global and zonal total ozone variations estimated from ground-based and satellite measurements: 1964-2000, Journal of Geophysical Research 107: 4647, doi: 10.1029/2001JD001350

Fox, C, 1873: Ozone and Antozone: Their History and Nature. London: J&A Churchill

Gehring, T, 1994: Dynamic International Regimes: Institutions for International Environmental Governance. Frankfurt: Peter Lang
Götz, F. et al, 1934: The vertical distribution of ozone in the atmosphere, Proceedings of the Royal Society of London A145: 416-446
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
Gribbin, J, 1988: The Hole in the Sky: Man's Threat to the Ozone. New York: Bantam
Griffith, R, McKeown, A, 1925: The photochemical and thermal decomposition of ozone, Transactions of the Faraday Society 21: 597-602
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
Haagen-Smit, A. et al, 1953: Ozone formation in photochemical oxidation of organic substances, Ind. Eng. Chem. 45 (9): 2086-2089
Haas, P, 1990: Saving the Mediterranean: The Politics of International Environmental Cooperation. New York: Columbia University Press
Haas, P. et al. (Hg), 1993 : Institutions for the Earth : Sources of Effective International Environmental Protection. Cambridge: MIT Press
Halfmann, J, 1980: Innenansichten der Wissenschaft. Frankfurt: Campus
Halfmann, J, 1984: Die Entstehung der Mikroelektronik. Zur Produktion technischen Fortschritts. Frankfurt: Campus
Halfmann, J, Schützenmeister, F, 2002: Problemorientierte Forschung und Schließungsprozesse der Wissenschaft: das Beispiel des Ozonlochs als Umweltproblem. Expertise, Dresden
Halfmann, J. et al, 2003: Problemorientierte Forschung und wissenschaftliche Dynamik. Das Beispiel der Klimaforschung. Forschungsantrag, Dresden
Hampson, J, 1964: Photochemical behavior of the ozone layer, Technical Note TN 1627/64, Canadian Armament Research and Development Establishment, Valcartier
Harrison, H, 1970: Stratospheric ozone with added water vapor – influence of high-altitude aircraft, Science 170: 734-736
Hauglustaine, D, Brasseur G, 2001: Evolution of tropospheric ozone under anthropogenic activities and associated radiative forcing of climate, Journal of Geophysical Research – Atmos. 106 (D23): 32337-32360
Hollandsworth, S. et al, 1995: Ozone trends deduced from combined Nimbus 7 SBUV and NOAA 11 SBUV/2 data, Geophysical Research Letters 22: 905-908
Houghton, J. et al, 2001: Climate Change 2001: The Scientific Basis. IPCC-Report. Cambridge: Cambridge University Press
Hunt, B, 1965: The need for a modified photochemical theory of the ozonosphere, Journal of Atmospheric Science 23: 88-95
Hunter, J, 1980: The national system of scientific measurement, Science 210: 869-874
IPCC/TEAP (Hg), 2005: Special Report on Safeguarding the Ozone Layer and Global Climate System, Cambridge
Johnston, H, 1971: Reduction of stratospheric ozone by nitrogen oxide catalysts from supersonic transport exhaust, Science 173: 517-522
Johnston, H, 1992: Atmospheric ozone, Annual Review of Physical Chemistry 43: 1-32
Jones, A, Shanklin, J, 1995: Continued decline of total ozone over Halley, Antarctica, since 1985, Nature 376: 409-411
Kasperson, J, Kasperson, R. (Hg), 2000: Global Environmental Risk. Tokyo: United Nations University Press
Kay, D, Jacobson, H, 1983: Environmental Protection: The International Dimension. Totowa: Osmund
Keohane, R, Levy, M, 1996: Institutions for Environmental Aid. Cambridge, MIT Press
Kirschten, U, 1992: Episode: FCKW. Ms. Berlin
Kopfmüller, J, Coenen, R. (Hg), 1997: Risiko Klima. Der Treibhauseffekt als Herausforderung für Wissenschaft und Politik. Frankfurt: Campus
Krohn, W, 1979: ‚Intern – extern', ‚sozial – kognitiv'. Zur Solidität einiger Grundbegriffe der Wissenschaftsforschung, in: C. Burrichter (Hg), Grundlegung der historischen Wissenschaftsforschung. Basel: Schwabe
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, Küppers, G, 1989: Die Selbstorganisation der Wissenschaft. Frankfurt: Suhrkamp
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
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
Leeds, A, 1880: Lines of discovery in the history of ozone, Annals of the New York Academy of Sciences 1 (3): 363-391
Le Prestre, P. et al. (Hg), 1998 : Protecting the Ozone Layer: Lessons, Models, and Prospects. Dordrecht: Kluwer
Lemmerich, J, 1990: Die Entdeckung des Ozons und die ersten 100 Jahre der Ozonforschung. Berlin: edition sigma
Levy II, H, 1971: Normal atmosphere: large radical and formaldehyde concentrations predicted, Science 173: 141-143

Liftin, K, 1994: Ozone Discourses: Science and Politics in Global Environmental Cooperation. New York: Columbia University Press
Lipschutz, R, Conca, K. (Hg), 1993 : The State and Social Power in Global Environmental Politics. New York: Columbia University Press
Lovelock, J, 1971: Atmospheric fluorine compounds as indicators of air movements, Nature 230: 379-381
Lovelock, J, 1974: Atmospheric halocarbons and stratospheric ozone, Nature 252: 292-294
Lovelock, J. et al, 1973: Halogenated hydrocarbons in and over the Atlantic, Nature 241: 194-196
Luhmann, N, 1968: Selbststeuerung der Wissenschaft, Jahrbuch für Sozialwissenschaft 19: 147-170
Luhmann, N, 1990: Die Wissenschaft der Gesellschaft. Frankfurt: Suhrkamp
Malberg, H, 1994: Meteorologie und Klimatologie. Eine Einführung. Springer: Berlin
McElroy, M. et al, 1986: Reductions of Antarctic ozone due to synergistic interactions of chlorine and bromine, Nature 321: 759-762
McGrath, W, Norrish, R, 1958: The study of energy transfer and energy distribution in fast chemical reactions by flash photolysis and kinetic spectroscopy, Zeitschrift für Physikalische Chemie. Neue Folge 15: 245-261
Merton, R, 1968: Social Theory and Social Structure. New York: Free Press
Midgley, Th, jr, Henne, A, 1930: Organic fluorides as refrigerants, Ind. Eng. Chem.. 22: 542-545
Miller, A, Mintzer, J, 1986: The Sky Is the Limit: Strategies for Protecting the Ozone Layer. Washington DC: World Resources Institute
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, L, Molina, M, 1987: Production of Cl2O2 from the self-reaction of the ClO radical, Journal of Physical Chemistry 92: 433-436
Molina, M, Rowland, F, 1974: Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalyzed destruction of ozone, Nature 249 (5460): 810-812
Nantze, J, 1991: What Goes Up: The Global Assault on Our Atmosphere. New York: William Morrow Publishing
NAS, 1965: Atmospheric Ozone Studies: An Outline for an International Observation Program. Washington DC: National Academy Press
NAS, 1975: Environmental Impacts of Stratospheric Flight: Biological and Climatic Effects of Aircraft Emissions in the Stratosphere. Washington DC: National Academy Press
NAS, 1976: Halocarbons: Effects on Stratospheric Ozone. Washington D.C: National Academy Press
NAS, 1979a: Protection Against Depletion of Stratospheric Ozone by Chlorofluorocarbons. Washington DC: National Academy Press
NAS, 1979b: Stratospheric Ozone Depletion by Halocarbons: Chemistry and Transport. Washington DC: National Academy Press
NAS, 1982: Causes and Effects of Stratospheric Ozone Reduction: An Update. Washington DC: National Academy Press
NAS, 1984: Causes and Effects of Changes in Stratospheric Ozone: Update 1983. Washington DC: National Academy Press
NASA, 1979: The Stratosphere: Present and Future. NASA Reference Publication 1049. Washington DC: NASA
Newell, R, 1963: The general circulation of the atmosphere and its effects on the movement of trace substances, Journal of Geophysical Research 68: 3949-3962
Newman, P. et al, 1997: Anomalously low ozone over the Arctic, Geophysical Research Letters 24: 2689-2692
Newman, P. et al, 2006: When will the Antarctic ozone hole recover? Geophysical Research Letters 33: L12814
Nicolet, M, 1955: the aeronomic problem of nitrogen oxides, Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics 7: 152-169
Noxon, J, 1978: Stratospheric NO2 in the Antarctic winter, Geophysical Research Letters 5: 1021-1022
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, 2001: Production and Consumption of Ozone Depleting Substances 1986 – 1999. Eschborn: GTZ
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
Parson, E, 2003: Protecting the Ozone Layer: Science and Strategy. New York: Oxford University Press
Peter, T, 1997: Microphysics and heterogeneous chemistry of polar stratospheric clouds, Annual Review of Physical Chemistry 48: 785-822
Ramanathan, V, 1975: Greenhouse effect due to chlorofluorocarbons: climatic implications, Science 190: 50-52
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
Regener, V, 1951: Vertical distribution of atmospheric ozone, Nature 167 (4242): 276-277
Revelle, R, Suess, H, 1957: Carbon dioxide exchange between atmosphere and ocean and the question of an increase in atmospheric CO2 during the past decade, Tellus 9: 18-27
Roan, S, 1990: Ozone Crisis. New York: Wiley & Sons
Roedel, W, 2000: Physik unserer Umwelt. Die Atmosphäre. Springer: Berlin
Rowland, F.S, 1975: Chlorofluoromethanes and stratospheric ozone – a scientific status report, New Scientist 68: 6-11
Rubin, M, 2001: The history of ozone. The Schoenbein period, 1839-68, Bull. Hist. Chem. 26: 40-56

Rubin, M, 2002: The history of ozone. II. 1869-1899, Bull. Hist. Chem. 27: 81-106
Rubin, M, 2003: History of ozone (Part 3): C.D. Harries and the introduction of ozone into organic chemistry, Helvetica Chimica Acta 86 (4): 930-940
Ruderman, M, Chamberlain, J, 1973: Origin of the Sunspot Modulation of Ozone: Its Implications for Stratospheric NO Injection, Doc. No. JSS-73-18-3. Arlington: Institute for Defense Analysis
Schiff, H, 1999: When Do We Know Enough about Atmospheric Chemistry?, in: G. Brasseur et al. (Hg), Atmospheric Chemistry and Global Change. New York: Oxford University Press
Schmeltekopf, A. et al, 1975: Measurements of stratospheric CFCl3, CF2Cl2, und N2O, Geophysical Research Letters 2: 393-396
Schmidt, M, 1988: Von Christian Friedrich Schönbein bis zum Ozonloch. Ein Abriss der Geschichte der Ozonforschung. MPI, Katlenburg-Lindau
Schnadt, C. et al, 2002: Interaction of atmospheric chemistry and climate and its impact on stratospheric ozone, Climate Dynamics 18: 501-517
Schreiner, J. et al, 1999: Chemical analysis of polar stratospheric cloud particles, Science 283 (5404): 968-970
Schützenmeister, F, 2006: Ozonforschung und atmosphärische Chemie. Ms. Dresden
Shine, K, 1986: On the modelled thermal response of he Antarctic stratosphere to a depletion of ozone, Geophysical Research Letters 13: 1331-1334
Simmons, E, 1990: Sixty-four years of regular ozone measurements, Meteorol. Mag. 119: 53-57
Singer, S.F. (Hg), 1975: The Changing Global Environment. Dordrecht: Reidel
Solomon, S, 1988: The mystery of the Antarctic ozone hole, Review of Geophysics 26: 131-148
Solomon, S, 1999: Stratospheric Ozone depletion: A Review of Concepts and History, Review of Geophysics 37: 275-316
Solomon, S. et al, 1986: On the depletion of Antarctic ozone, Nature 321: 755-758
Staehelin, J. et al, 1998a: Total ozone series at Arosa (Switzerland): Homogenisation and data comparison, Journal of Geophysical Research 103: 5827-5841
Staehelin, J. et al, 1998b: Trend analysis of the homogenized total ozone series of Arosa (Switzerland), 1926-1996, Journal of Geophysical Research 103: 8389-8399
Staehelin, J, Weiss, A, 2001: Swiss history of atmospheric ozone research and results of long-term Swiss ozone measurements, Ozone-Sci. Eng. 23: 461-466
Staehelin, J. et al, 2001: Ozone trends: A review, Review of Geophysics 49: 231-290
Stolarski, R, 1999: History of the study of atmospheric ozone (online), http://hyperion.gsfc.nasa.gov/Personnel/people/Stolarski_Richard_S./history.html
Stolarski, R, 2001: History of the study of atmospheric ozone, Ozone-Sci. Eng. 23 (6): 421-428
Stolarski, R, Cicerone, R, 1974: Stratospheric chlorine: a possible sink for ozone, Canadian Journal of Chemistry 52: 1610-1615
Stolarski, R. et al, 1986: Nimbus 7 SBUV/TOMS measurements of the springtime Antarctic ozone decrease, Nature 322: 808-811
Tolba, M, Rummel-Bulska, I, 1998: Global Environmental Diplomacy: Negotiating Environmental Agreements for the World, 1973-1992. Cambridge: MIT Press
Toon, O. et al, 1986: Condensation of HNO3 and HCl in the winter polar stratospheres, Geophysical Research Letters 13: 1284-1287
Tung, K. et al, 1986: Are Antarctic ozone variations a manifestation of dynamics or chemistry?, Nature 333: 811-814
Turner, B. et al. (Hg), 1992 : The Earth as Transformed by Human Action: Global and Regional Changes in the Biosphere over the Past Three Hundred Years. Cambridge: Cambridge University Press
U.K. Department of the Environment, 1976: Chlorofluorocarbons and Their Effect on Stratospheric Ozone. Pollution Paper 5. London: HMSO
U.K. Department of the Environment, 1979: Chlorofluorocarbons and Their Effect on Stratospheric Ozone (Second Report). Pollution Paper 15. London: HMSO
UNEP, Ozone Secretariat, 2003: Handbook for the International Treaties for the Protection of the Ozone Layer. Nairobi
Vedder, J.F. et al, 1978: Lower stratospheric measurements of variation with latitude of CF2Cl2, CFCl3, CCl4 and N2O profiles in the northern hemisphere, Geophysical Research Letters 5: 33-40
Viggiano, A. et al, 1995: Ozone destruction by chlorine: The impracticality of mitigation through ion chemistry, Science 267: 82-84
Victor, D. et al, 1998: The Implementation and Effectiveness of International Environmental Commitments: Theory and Practice. Cambridge: MIT Press
Voigt, C. et al, 2000: Nitric Acid Trihydrate (NAT) in polar stratospheric clouds, Science 290: 1756-1758
Watson, R. et al, 2001: Climate Change 2001: Synthesis Report. IPCC-Report. Cambridge: Cambridge University Press
Wayne, R, 2000(1985/1991): Chemistry of Atmospheres. Oxford: Clarendon Press
Weigert, F, 1907: Chemical light effects II. Photochemical sensibilised gas reactions and a theory of catalytic light effect. Annalen der Physik 24: 243-266
Weingart, P, 1976: Wissensproduktion und soziale Struktur. Frankfurt: Suhrkamp
Weingart, P, 1987: Interdisziplinarität als List der Institution, in: J. Kocka (Hg), Interdisziplinarität: Praxis – Herausforderung – Ideologie. Frankfurt: Suhrkamp

Weingart, P, 2001: Die Stunde der Wahrheit? Zum Verhältnis der Wissenschaft zu Politik, Wirtschaft und Medien in der Wissensgesellschaft. Weilerswist: Velbrück Wissenschaft

Weingart, P. et al, 2002: Von der Hypothese zur Katastrophe. Der anthropogene Klimawandel im Diskurs zwischen Wissenschaft, Politik und Massenmedien. Opladen: Leske + Budrich

Weisser, C. et al, 2004: Composition analysis of liquid particles in the Arctic stratosphere, Atmospheric Chemistry & Physics Discussion 4: 2513-2531

WMO, 1982: The Stratosphere 1981. Theory and Measurements. Report 11. Genf

WMO, 1986: Atmospheric Ozone: 1985, 3 Volumes. Global Ozone Research and Monitoring Project. Report 16. Genf

WMO, 1988: International Ozone Trends Panel Report 1988. Report 18. 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

WMO, 2008: 2008 ozone hole larger than last year (http://www.theozonehole.com/esa2008.htm)

Wofsy, S, McElroy, M, 1974: HOx, NOx, and ClOx: their role in atmospheric photochemistry, Canadian Journal of Chemistry 52: 1582-1591

Wofsy, S. et al, 1975: The chemistry of atmospheric bromine, Geophysical Research Letters 2: 215-218

Young, O. (Hg), 1999: The Effectiveness of International Environmental Regimes: Causal Connections and Behavioral Mechanisms. 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