

Dietrich Spänkuch

Zur Entwicklung der Meteorologie in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts

Wolfgang Böhme zum 75. Geburtstag gewidmet

1. Definitionen

Die Entwicklung der Meteorologie verlief in den letzten 50 Jahren wie die Entwicklung in anderen Wissenschaftsdisziplinen in der Periode des exponentiellen Wissenszuwachses faszinierend und stürmisch. Am deutlichsten offenbart sich diese Entwicklung in der Anpassung der Definition der Meteorologie an den aktuellen Kenntnisstand. Bis Mitte der 80er Jahre war die Meteorologie allgemein „die Wissenschaft von den *physikalischen* Zuständen und Vorgängen in der Atmosphäre und ihren Wechselwirkungen mit der festen und flüssigen Erdoberfläche“ (Meyers Enzyklopädisches Lexicon, Bd. 16, Bibliogr. Inst. Mannheim/Wien/Zürich, Lexiconverlag 1976, korr. Nachdruck 1981).

Gelegentlich findet sich diese veraltete Definition auch noch in neueren Nachschlagewerken (z.B. Lexicon der Physik in sechs Bänden, Spektrum-Akademischer Verlag Heidelberg Berlin, 1999). Dabei hatte Meyers Neues Lexicon vom VEB Bibliographischem Institut Leipzig in seiner zweiten Auflage von 1974 die Meteorologie bereits als die „Wissenschaft von den *physikalischen und chemischen* atmosphärischen Zuständen und Prozessen“ definiert, wenn auch bei der dortigen Aufzählung der Teildisziplinen diese Aufgabenerweiterung in Form der Luft- oder Atmosphärischen Chemie noch nicht ihren Niederschlag fand¹ (Abb. 1). Heute stehen Atmosphärische Physik, Atmosphärische Chemie, Dynamische oder Theoretische Meteorologie und Angewandte Meteorologie als gleichberechtigte Teildisziplinen nebeneinander.

1. Siehe Möller (1998) zur Definition von Atmosphärischer Chemie und historischen Bezügen.

Die *Klimatologie* andererseits, in Abb. 1 noch eine Teildisziplin der Meteorologie, und zwar gelegentlich sogar ein Aschenputtel¹, hat eine derartige wesentliche Begriffserweiterung erfahren², dass sie als *das* Paradebeispiel eines interdisziplinären Forschungsgebiets gilt und das Dach der Meteorologie verlassen hat³. Heute ist sie durch die tiefgreifenden Auswirkungen möglicher Klimaänderungen als Klimaforschung zum Weltstar avanciert. Politik und Öffentlichkeit wurden sensibilisiert und haben den Meteorologen die ungewohnte Rolle eines wichtigen Experten zugewiesen, eine Rolle, die von führenden Fachkollegen seit Anfang der 70er Jahre mit zwei internationalen Studien, der Study of Critical Environmental Problems (SCEP 1970) und der Study of Man's Impact on Climate (SMIC 1971) gefordert wurde. Die Empfehlungen der Klimaforschung besitzen ein so hohes politisches Gewicht wie keine anderen wissenschaftlichen Erkenntnisse zuvor in der Geschichte der Menschheit (Graßl 1999). Zur Zeit wird vom Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) gerade der dritte Einschätzungsbericht fertiggestellt (IPCC 2001).

-
1. „You hardly heard the word (climatology, D.S.) professionally in the 1940s. It was a layman's word. Climatologists were the halt and the lame ... in the British Service (Britischer Wetterdienst, D.S.). You actually had to be medically disabled in order to get into the climatological division. (Hare 1978). Prof. K. Hare war u.a. Vorsitzender der Advisory Group on Greenhouse Gases des Welt-Klima-Programms (siehe WMO 1989 für weitere Details).
 2. Nach Brockhaus (1997) ist Klimatologie die Wissenschaft vom Klima, den Klimaänderungen und deren Auswirkungen, primär Teilgebiet der Meteorologie, in den erdkundlichen Bezügen und Auswirkungen auch der Geographie (Klimageographie), bezüglich der paläoklimatischen (Paläoklimatologie) auch der Geologie, Glaziologie und Biologie, in den Grundlagen auch der Physik und Chemie u.a., somit ausgeprägt interdisziplinär.
 3. Einige neuere Definitionen der Meteorologie tragen dieser Entwicklung bereits Rechnung wie Brockhaus (1997). Die Definition von The new Encyclopedia Britannica, Vol.18, 15th ed. (1998) geht mit dieser Trennung eindeutig zu weit, denn sie nimmt der Klimatologie ihre Wurzeln. In vollem Wortlaut heißt es dort: Meteorology – scientific discipline concerned with atmospheric phenomena, particularly of the troposphere and lower stratosphere. Meteorology entails a systematic study of short-term – that is, day-to-day – variations in temperature, humidity, air pressure, wind, cloud cover, and precipitation, along with their causes. It provides the basis for weather forecasting. Meteorology is closely related, but distinct from climatology, which deals with weather conditions in a given area over an extended period of time (from a month to many millions of years).
Diese Definition schränkt den Bereich der Meteorologie sehr weit ein. Luftchemische Parameter und deren Umwandlung und Transport in der Atmosphäre fehlen gänzlich.

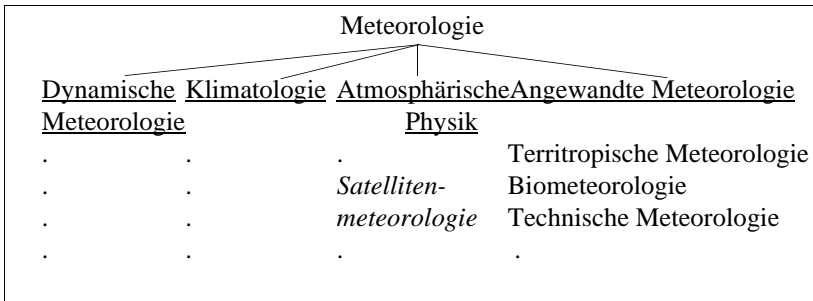


Abb.1:

Die Einteilung der Meteorologie um 1960. Auf eine weitere Unterteilung der Teildisziplinen wurde verzichtet. Siehe hierzu Flemming (1971), der bereits die Chemische Meteorologie erwähnt, und Anmerkungen 2 bis 5.

Abb. 1 enthält im Vergleich zum Stand von 1950 eine weitere neue Teildisziplin, die *Satellitenmeteorologie*. Als Plattform außerhalb der Atmosphäre ermöglichen Satelliten erstmalig die direkte Messung von Energieflüssen, die in die Atmosphäre eindringen und sie via Weltraum wieder verlassen wie solare Einstrahlung, in den Weltraum reflektierte Sonnenstrahlung und langwellige Wärmeabstrahlung, deren spektrale Abhängigkeit und ihre Variationen in Raum und Zeit. Diese Größen sind grundlegend für eine profunde Kenntnis der Energiebilanz unseres Planeten (z.B. Spänkuch 1991, 1995).

Satelliten ermöglichen weiter mittels Fernerkundung ein Monitoring des atmosphärischen Zustands in globalem Maßstab. Die Flut internationaler Programme zur Erforschung und Überwachung atmosphärischer Prozesse basiert zu einem wesentlichen Teil auf dem Potenzial der Satellitenmeteorologie. Die Meteorologie, per se international¹, hat diese Möglichkeit wie alle technischen Errungenschaften in ihrer Geschichte begierig aufgenommen und genutzt.

1. Die Encyclopedia Americana (1995) betont ausdrücklich den internationalen Charakter der Meteorologie. Ihre Definition verzichtet auf eine Unterteilung in Teildisziplinen, gibt aber dennoch eine umfassende Definition wie folgt: Meteorology – the science of the atmosphere, especially of weather. Meteorology is the most international of scientific activities. Its realm is the atmosphere of the entire globe, and its practice involves the daily cooperation of every nation on earth. Modern meteorology applies the principles of physics, chemistry, and mathematics to the phenomena of the atmosphere. The science investigates many allied fields including electrical activities, turbulent air flow, solar and terrestrial radiation, acoustical transmission, physics of clouds and precipitation and related weather modification, micrometeorology (the study of small-scale occurrences near the surface), and hydrometeorology (the study of the water cycle).

2. Internationale Programme

Die Liste internationaler meteorologischer bzw. interdisziplinärer Aktivitäten und Programme mit meteorologischen Aufgabenstellungen, die in den letzten 50 Jahren durchgeführt oder initiiert wurden, ist lang und eindrucksvoll. Sie beginnt mit dem International Geophysical Year (IGY), das vom 1. Juli 1957 bis Ende 1958 während besonders intensiver Sonnenaktivität, vom International Council of Scientific Unions (ICSU) organisiert, erstmalig die internationale Zusammenarbeit auf geowissenschaftlichem Gebiet nach dem 2. Weltkrieg wieder in Gang brachte. Umfang und Mittel übertrafen bei weitem die während der internationalen Polarjahre in den Vorkriegsjahren aufgewandten Mittel (Böhme und Körber, 1984). Ziele des IGY waren die globale Erfassung geophysikalischer Parameter, ein besseres Verständnis der allgemeinen Zirkulation der Atmosphäre und die Untersuchung solar-terrestrischer Beziehungen. Ein weltweites Netz von Radiosonden- und Raketenstationen lieferte die notwendige Datenbasis für die höheren Atmosphärenschichten, sodass erstmals tägliche Wetterkarten der Stratosphäre am Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin unter Leitung von Richard Scherhag erstellt werden konnten (Labitzke 1999). Wissenschaftliches Hauptergebnis des IGY war zweifelsohne die Entdeckung der annähernd zweijährigen Schwingung der Atmosphäre (QBO, Quasi-Biennial Oscillation)¹, d.h., eigentlich eine gesicherte Bestätigung bereits fast einhundert Jahre zurückliegender Befunde (näheres siehe Labitzke 1999).

Während die Nachfolgeprogramme, die Internationale Geophysikalische Kooperation (IGC) 1959 und das Internationale Jahr der ruhigen Sonne (IQ-SY) in den Jahren 1964 und 1965 noch liefen, startete 1963, von der Meteorologischen Weltorganisation WMO initiiert, bereits die Welt-Wetter-Wacht (WWW, World Weather Watch) mit ihren drei Komponenten GOS (Global Observing System), GTS (Global Telecommunication System) und GDPS (Global Data Processing System) zur Verbesserung meteorologischer Daten-Erzeugung, -Verarbeitung und -Verbreitung als logische Folge auf die erfolgreiche Entwicklung künstlicher Erdtrabanten, um die Nutzung der neuen technologischen Möglichkeiten für die Wettervorhersage und weitere meteorologische Anwendungen voranzutreiben. WWW war die Antwort der WMO auf Resolution 1721 der XVI. UN-Vollversammlung im Jahre 1961, in der

1. In seiner Habilitationsschrift untersuchte W. Böhme (1969) Wirkungen der QBO außerhalb der Tropen und deren mögliche Nutzung für prognostische Aussagen. So fand er die ungefähr 26-monatige Schwingung in den meridionalen Zirkulationstypen über Europa.

Aktivitäten zu einer verbesserten Kenntnis der grundlegenden physikalischen Kräfte, die das Klima bestimmen, sowie die Untersuchung der Möglichkeiten großräumiger Wetterbeeinflussung angefordert wurden. Des Weiteren sollten die existierenden Vorhersagezentren ausgebaut und regionale Vorhersagezentren geschaffen werden. In einer weiteren UN-Resolution 1802 auf der XVIII. UN-Vollversammlung 1963 wurde ICSU die Entwicklung eines ausgedehnten Forschungsprogramms auf dem Gebiet der atmosphärischen Wissenschaften zur Ergänzung des WWW-Programms der WMO angetragen. So wurde 1966 das Globale Atmosphärische Forschungsprogramm GARP (Global Atmospheric Research Programme) mit zwei Aufgabenstellungen, der Verbesserung der Wettervorhersage sowie der Bestimmung der Grenzen der Vorhersagbarkeit, und der Untersuchung der Klimadynamik (ICSU/WMO 1973) konzipiert¹. Zum GARP Atlantic Tropical Experiment (GATE) im tropischen Ozean 1974 zur Untersuchung der tropischen Atmosphäre und deren Rolle in der allgemeinen atmosphärischen Zirkulation wurde erstmalig ein spezieller operationeller Wettersatellit in geostationärer Umlaufbahn, der SMS 1 (Synchronous Meteorological Satellite), eingesetzt.

World Climate Data and Monitoring Programme (WCDMP)	WMO
World Climate Applications and Services Programme (WCASP) ¹	WMO
World Climate Impact Assessment and Response Strategies Programme (WCIPRP)	UNEP
World Climate Research Programme (WCRP)	WMO ICSU ¹ IOC ²

Tabelle 1:

Komponente des Weltklimaprogramms mit federführenden Organisationen

¹ICSU – International Council of Scientific Unions, ²IOC – Intergovernmental Oceanographic Commission der UNESCO

1. Das Satellitenbeobachtungsprogramm mit all seinen Komponenten wurde wesentlich von der schon legendären Arbeitsgruppe 6 des Committee on Space Research (COSPAR) unter Leitung von Morris Tepper konzipiert (COSPAR 1970), in der auch W. Böhme aktiv tätig war (WMO 1998).

Heute ist die Fülle internationaler Programme der Meteorologie und Klimatologie zur Lösung aktueller Probleme fast unüberschaubar. Am bekanntesten ist wahrscheinlich das Weltklimaprogramm (World Climate Programme WCP), das im Anschluss an die erste Weltklimakonferenz im Februar 1979 auf dem VIII. WMO-Kongress im Juni 1979 mit seinen vier Unterprogrammen beschlossen wurde (Tab.1). Die internationalen Programme, die während ihrer Existenz auch modifiziert wurden und hier nur skizziert werden konnten, waren und sind ein bedeutender und nicht zu unterschätzender Antrieb des Erkenntnisgewinns in der Meteorologie. Wohl keine andere Fachdisziplin kann sich auf eine solche internationale Kooperation stützen.

3. Atmosphärische Chemie

Beginnen wir mit einem der jüngsten Zweige der Meteorologie, der atmosphärischen Chemie. Zunehmende Umweltprobleme, die in ihrer Neuartigkeit und ihren regionalen und globalen Auswirkungen weit über die bisherigen Erfahrungen hinausgingen, machten es notwendig, unmittelbar verstärkt chemische Prozesse in der Atmosphäre zu untersuchen (Tab.2).

Problem	Erstes Erkennen/ Auftreten	Ursache
Fotosmog	50er Jahre	O ₃ , NO _x
Saurer Niederschlag	späte 60er Jahre	SO ₂ , NO
Beeinträchtigung der Ozonschicht	1970	NO _x , FCKW, u.a.
Folgen eines Kernwaffenkrieges	1945	Ruß, NO _x
Treibhauseffekt	50er Jahre	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, O ₃ , FCKW
Neuartige Waldschäden	Ende der 70er Jahre	SO ₂ , O ₃ , NO _x

Tabelle 2:

Umweltprobleme, die verstärkt atmosphärenchemische Untersuchungen erforderten

Natürlich waren Umweltprobleme über Jahrhunderte hinaus bekannt. Aber sie waren zumeist lokaler Natur und der Verursacher somit leicht identifizierbar. Die Kausalkette war direkt und überschaubar. So wurden z.B. 1822 bereits Umweltschäden an Nadelbäumen im Harz auf dortige Hüttenwerke, und

zwar weniger auf Schwermetalle als auf SO_2 , zurückgeführt (Schramm 1986). Die neuen Umweltschäden, die zusätzlich zu den lokal begrenzten Umweltschäden zu Besorgnis führten, traten entweder regional weit entfernt von etwaigen Quellen auf wie Sichtminderung in der Arktis (arktischer Dunst), der saure Niederschlag in Skandinavien mit seinen Auswirkungen auf die dortigen aquatischen Ökosysteme (Odén 1976), das „Ozonloch“ in der Antarktis, oder sie waren sogar globaler Natur. Die Selbstreinigung der Atmosphäre, die „es schon machen würde“, wenn die Schornsteine nur genügend hoch gebaut würden, wurde zweifellos überschätzt. Die Ursache all dieser Umweltprobleme ist die mehr oder minder kräftige Störung der natürlichen Stoffwechselkreisläufe durch menschliche Aktivitäten. Der Wasserkreislauf wird direkt und indirekt durch zunehmende Versiegelung der Böden, veränderte Landnutzung, u.a. geändert, der Schwefelkreislauf wird sogar dominiert, Ozon- und Kohlenstoffkreislauf kräftig gestört, und der anthropogene Anteil am Stickstoffkreislauf ist dem des natürlichen Anteils äquivalent.

Tabelle 3 gibt für die wesentlichen neuen Umweltprobleme einen Überblick über beteiligte Substanzen, ihre natürlichen und anthropogenen Quellen sowie über wesentliche Effekte und deren Andauer. Über Dekaden und Jahrhunderte andauernde Effekte betreffen nächste Generationen und fordern daher besondere politische Verantwortung, der globale bzw. regionale Charakter zwingend internationale Kooperation.

Tabelle 3 zeigt auch, dass nicht die Hauptbestandteile der Atmosphäre, Stickstoff und Sauerstoff, die Aktivposten chemischer Prozesse in der Atmosphäre sind, sondern atmosphärische Spurenstoffe mit Konzentrationen von 10^{-6} bis 10^{-14} . Die Bedeutung verschiedener atmosphärischer Spurengase auf das globale Klima und chemische Prozesse in der Atmosphäre ist in Tabelle 4 zusammengestellt (Kondratyev 1990). Diese Arbeit enthält, basierend auf der angegebenen Wirkung, weitere Tabellen zu Anforderungen an Messgenauigkeit und raumzeitliche Auflösung.

Problem	Smog und aktischer Dunst	Saurer Niederschlag	Atmosphärische toxische Substanzen	Treibhaus-effekt	Radioaktivität
Substanzen	Säuren Metalle Organic and Acidic Sulfate Oxidantien Stickoxide	Schwefeloxide Stickoxide	Dioxine/ Furone Schwermetalle PAH PCB Pestizide VOC Fiber	CO ₂ FCKW CH ₄ N ₂ O NO _x	Radionuklide
Wesentliche Quellen:					
anthropogen	Fossile Brennstoffe	Fossile Brennstoffe Hüttenwerke	Fossile Brennstoffe Mülldeponien Bergbau Landwirtschaft Forstwirtschaft	Fossile Brennstoffe Aerosolspray Kühlmittel Landwirtschaft Abholzung	Kernkraft Bergbau Kernwaffen-Tests
natürlich	Wälder	Vulkane Feuchtgebiete	Vulkane Waldbrände Algen	Vulkane Waldbrände	Böden Grundgestein
Wesentliche Effekte	Sichtweite Gesundheit Klima Flora	Seen Böden Wälder	Gesundheit Wasser Böden Nahrungsketten	Klima und Folgen (z.B. Meeresspiegel-Anstieg) Gesundheit	Gesundheit Wasser Böden Biota
Dauer des Effekts	Tage/Monate	Jahre	Dekaden	Dekaden/Jahrhunderte	verschiedene Zeitskalen

*Tabelle 3:
Umweltrelevante atmosphärische Spurenstoffe und ihre hauptsächlichlichen Quellen sowie die damit verbundenen Umweltprobleme (nach Ferguson 1989, Bruce 1990)*

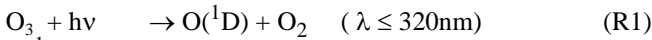
Substanz	Einwirkung auf		Wechselwirkung Klima-Chemie
	chemische Prozesse	Klima	
CO ₂	0	2	1
O ₃	2	2	2
CH ₄	2	1	1
CO	2	0	1
N ₂ O	2	1	1
NO _x = NO + NO ₂	2	0	1
OH	2	0	1
CFCl ₃	2	1	1
CF ₂ Cl ₂	2	1	1
CF ₂ ClBr	2	0	1
CF ₃ Br	2	0	1
SO ₂	1	0	1
COS	1	0	1

Tabelle 4:

Bedeutung verschiedener gasförmiger Spurenstoffe auf chemische Prozesse in der Atmosphäre und das globale Klima. 2: sehr wichtig, 1: wichtig, 0: unbedeutend (Kondratyev 1990).

3.1 Troposphärische Chemie

Die Wichtung in Tabelle 4 ist zugegebenermaßen recht grob. Insbesondere wird sie der immensen Rolle von OH nicht gerecht, die erst Anfang der 70er Jahre durch Hiram Levy II (1971,1972) erkannt worden war. Bis dahin hatte man angenommen, dass in der Troposphäre, abgesehen von einigen stark verschmutzten Regionen, fotochemische Prozesse nur eine untergeordnete Rolle spielen. Die Oxidation von Spurengasen wie CO und CH₄ sollte ausschließlich in der Stratosphäre stattfinden (Junge 1963). Das Hydroxylradikal wird durch folgende Reaktionen gebildet: Fotodissoziation von Ozon (R1) und Verbindung von elektronisch angeregten O(¹D)-Atomen mit Wasserdampf (R2)



Die Bildung von OH benötigt daher Ozon, solare UV-Strahlung unter 320 nm, die Ozon zu angeregtem atomarem Sauerstoff und Sauerstoff zersetzen kann, und Wasserdampf. Die weitaus bedeutendste Senke für OH sind die Reaktionen mit CO (R3) und CH₄ (R4) mit Nachfolgereaktionen im Ozonkreislauf



die die Lebenszeit von OH auf etwa 1 bis 10s beschränken und auch die Lebensdauer von CO und CH₄ bestimmen. OH tritt in der Atmosphäre in verschwindend geringen Mengen auf, im Durchschnitt entfallen nur 4 Teilchen auf 10¹⁴ Luftmoleküle. Da es aber mit fast allen natürlichen und anthropogenen Gasen reagiert, - Ausnahmen sind die FCKW und N₂O, die sich daher auch ungestört bis in die Stratosphäre ausbreiten können -, reinigt es als „Waschmittel“ die Atmosphäre von diesen Gasen. OH steht mit dem Hydroperoxidradikal HO₂, das OH in Verbindung mit NO und O₃ zurückbilden kann, in fotochemischem Gleichgewicht. Abb. 2 zeigt in einem vereinfachten Schema die Wirkung von OH und HO₂, zusammen als HO_x bezeichnet, auf einige wichtige andere atmosphärische Spurenstoffe.

Bis Anfang der 70er Jahre nahm man an, dass das Ozon der Troposphäre, das etwa 10% des Gesamt ozonegehalts ausmacht und für die Reaktion (R1) benötigt wird, ausschließlich stratosphärischen Ursprungs ist, d.h. aus der Stratosphäre in die Troposphäre transportiert wird. Dann wurde als troposphärische Quelle von Ozon die Oxidation von NO zu NO₂ durch HO₂ gefunden, die durch einen katalytischen Zyklus von NO_x unter Mitwirkung von CH₄ und CO angetrieben wird (Chameides und Walker 1973, Crutzen 1974a). Das Verhältnis der Reaktionsraten von OH mit CO, O₃ und flüchtigen organischen Verbindungen (VOC: volatile organic compounds) einerseits und von HO₂ mit NO und O₃ andererseits bestimmt den jeweiligen Anteil von OH und HO₂ an HO_x. Mit zunehmendem CO oder VOC steigt der Anteil von HO₂ relativ zu OH. Die Konzentration von HO₂ übertrifft i.a. die von OH um ein bis zwei Größenordnungen (Brune 2000). Ob Ozon in der Troposphäre gebildet oder zerstört wird, hängt von der Konzentration der Stickoxide NO und NO₂ ab. Als Folge komplizierter Reaktionsketten kann die Ozonbildung

NO_x -begrenzt – Ozonbildung steigt mit zunehmendem NO_x – oder NO_x – gesättigt sein – Ozonbildung bleibt konstant oder nimmt mit zunehmendem NO_x ab.

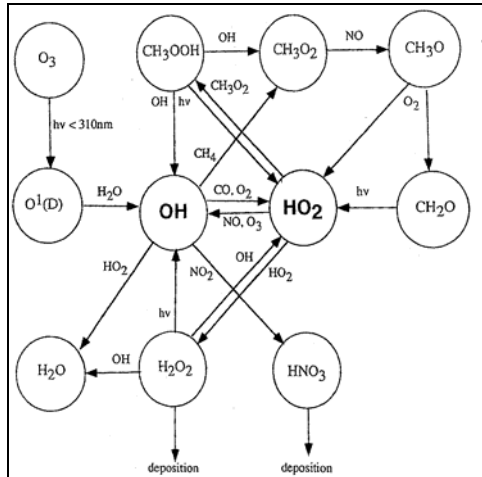


Abb. 2:

Vereinfachtes Schema der Beziehung der Radikale $\text{HO}_x = \text{OH} + \text{HO}_2$ auf einige weitere wichtige atmosphärische Spurenstoffe (nach Mount und Williams 1997)

In niedrigen Breiten ist wegen hoher Sonneneinstrahlung und hohem Feuchtegehalt der Luft die OH-Produktion nach (R1) und (R2) höher als in gemäßigten und hohen Breiten. Der OH-bedingte Abbau von CO und CH_4 ist daher hier am effektivsten. Allerdings sind die Tropen durch die regelmäßige Verbrennung von Biomasse in der trockenen Jahreszeit auch eine bedeutende Quelle von Luftverunreinigungen. Bis Ende der 80er Jahre wurden in der Troposphäre neben der Gasphasenchemie nur chemische Prozesse an und in Wolkentröpfchen und Niederschlagsteilchen untersucht (Abb.3). Man nahm an, dass der geringe Anteil an flüssigem Wasser in den wesentlich kleineren Aerosolteilchen keine Reaktionen ermöglichen würden, die mit denen an und in Wolkentröpfchen konkurrieren könnten. In der Zwischenzeit sind zahlreiche Reaktionen bekannt geworden (Andreae und Crutzen 1997, Ravishankara 1997), die den heterogenen (Reaktionen an festen Teilchen) und Multiphasenprozessen (Reaktionen an und in Flüssigkeitsteilchen) eine bedeutende Rolle in der Chemie der Troposphäre zukommen lassen. Die Zeitkonstanten der chemischen und Transportprozesse sind in der Troposphäre von gleicher Größenordnung, sodass troposphärische Chemie und Transport

eng miteinander gekoppelt sind (Kley 1997). Angesichts der Unzahl chemischer Substanzen, die von natürlichen und anthropogenen Quellen in die Atmosphäre gelangen oder dort in situ gebildet werden (z.B. Finlayson-Pitts und Pitts Jr. 1997), der zahlreichen, zum großen Teil noch unbekanntenen Reaktionsketten, der mangelnden Kenntnis der Aerosoleigenschaften in globalem Maßstab und der engen Wechselwirkung zwischen Chemie und Transport über Größenordnungen von Scales (siehe Abschnitt 5) hinweg steht die Troposphärenchemie trotz beachtlicher Erfolge noch am Anfang.

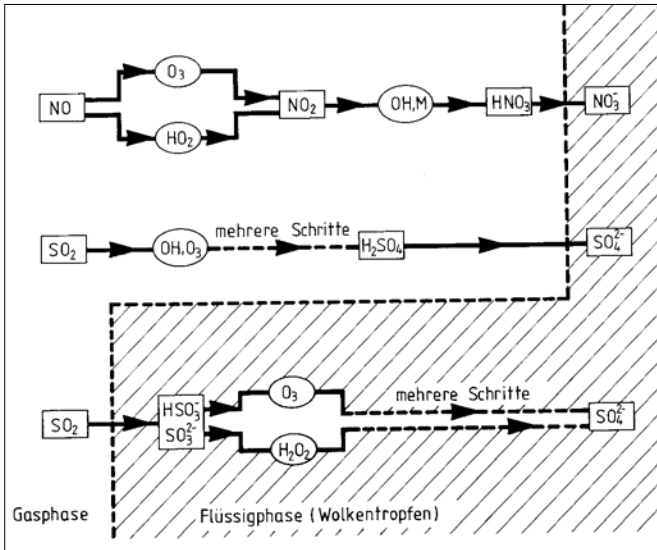


Abb. 3:
Chemische Reaktionen an Wolkentröpfchen (nach Fabian 1992)

3.2 Stratosphärische Chemie

Die Stratosphäre, der Höhenbereich zwischen etwa 10 und 50 km mit Temperaturzunahme oberhalb der Tropopause, ist ein einmaliges Phänomen in unserem Sonnensystem (Abb.4). Es verdankt seine Existenz der Absorption der solaren UV-Strahlung und damit lokaler Aufheizung durch Ozon. Ozon ist das einzige Gas, dessen Konzentration in der Stratosphäre mit etwa 90% der Gesamtmenge höher als in der Troposphäre ist. Dennoch ist auch das Ozon in der Stratosphäre mit maximal 10 ppm(v) ein Spurengas. Bis etwa

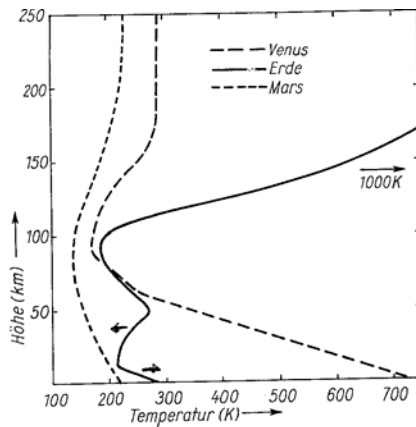
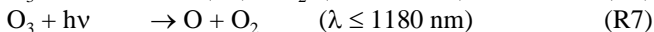
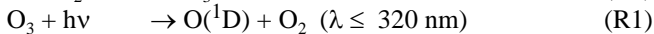
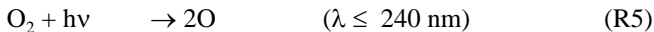


Abb. 4:

Der Temperaturverlauf als Funktion der Höhe für die Atmosphären der erdähnlichen Planeten (nach Taubenheim 1991). Die Pfeile an der terrestrischen Temperaturkurve zeigen die Wirkung anthropogener Klimabeeinflussung. Die Änderungen in der Stratosphäre sind um eine Größenordnung stärker als an der Erdoberfläche.

Mitte der 60er Jahre wurde angenommen, dass die von Sydney Chapman 1930 aufgestellte Theorie, nämlich Ozonbildung durch Fotolyse molekularen Sauerstoffs durch kurzwellige solare UV-Strahlung (R5) mit nachfolgender Reaktion (R6), und Ozonvernichtung durch Fotolyse von Ozon durch solare UV-Strahlung (R1,R7) sowie Verbindung von Ozon mit atomaren Sauerstoff (R8) die Ozonverteilung in der Stratosphäre adäquat beschreibt. M ist ein aus energetischen Gründen neutraler Stoßpartner (Stickstoff- oder Sauerstoffmolekül). Die Reaktionen der Ozonbildung (R5) und (R6) waren bereits 1900 von Philipp Lenard experimentell gefunden worden (Feister 1990).



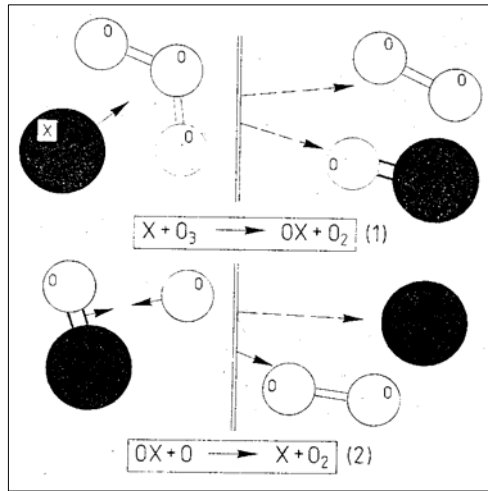
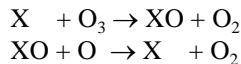


Abb. 5:

Schema der katalytischen Ozonzerstörung. X = Katalysator (NO, H, OH, Cl, Br, F)

Doch dann setzte eine nahezu atemberaubende Entwicklung der Erkenntnisse ein, die in ihrer Dramatik kaum zu überbieten sein dürfte (Roan 1989, WMO 1998b, Crutzen 1999, 2000). Zwar war bereits vorher bekannt, dass die fotochemische Gleichgewichtstheorie Chapmans etwa 30% mehr Ozon vorausagt als beobachtet wurde und nur oberhalb von 25 bis 30 km befriedigende Übereinstimmung mit der beobachteten vertikalen Ozonverteilung bestand, die Defizite wurden aber durch entsprechende atmosphärische Transportvorgänge erklärt (Paetzoldt 1961). Erst die Untersuchung der Rolle von Katalysatoren (Abb.5) brachte Bewegung in die Entwicklung. Die Ausarbeitung der katalytischen Abbauzyklen des Ozons gemäß (R9) mit dem Katalysator X



begann 1965 mit den Wasserstoffradikalen HO_x (OH, HO_2) als Katalysator X durch J. Hampson (1965) und G. Hunt (1966), zu denen später weitere Radikale dieser Familie hinzukamen (H, H_2O_2 , u.a.). Zu dieser Zeit fehlten aber Labormessungen der entscheidenden Reaktionskoeffizienten, sodass diese

Autoren „plausible“ Werte annahmen, um die Diskrepanz zwischen Messungen und Theorie aufzuheben. Vier Jahre danach wies Crutzen (1969) darauf hin, dass der Ozonabbau in der Troposphäre mit diesen Reaktionskoeffizienten zu schnell verlaufen würde. Heute wissen wir, dass der HO_x -Zyklus vor allem in der Mesosphäre oberhalb von 50 km und in der Troposphäre von Bedeutung ist und nur etwa 2% am 30-prozentigen Ozonüberschuss der Chapman-Theorie ausmacht.

Ende der 60er Jahre begann der Ausbau des NO_x -Zyklus (Bates und Nicolet 1967, Crutzen 1970, Johnston 1971) mit $\text{X}=\text{NO}$, zunächst in vereinfachter Form und mit ungenauen Reaktionskoeffizienten. Johnston hatte seine Arbeiten im Rahmen von Studien zu möglichen Folgen stratosphärischen Überschallflugverkehrs auf die Umwelt durchgeführt und gefunden, dass das NO_x -Problem wesentlich gefährlicher ist als der Eintrag von Wasserdampf in die Stratosphäre. Seine Abschätzung führte bei einer Annahme von 500 zivilen Überschallflugzeugen des Typs Boing zu einer Reduktion der Ozonschicht um 50%. Dies war der erste Hinweis der Gefährdung der Ozonschicht durch menschliche Aktivitäten. Johnstons alarmierendes Ergebnis initiierte große Forschungsprogramme, in den USA das erste umfangreiche Programm zur Untersuchung menschlicher Aktivitäten auf die Atmosphäre, das Climate Impact Assessment Program (CIAP), und in Europa. Wichtige Reaktionsraten wurden unter stratosphärischen Bedingungen erstmals bzw. neu bestimmt, umfangreiche Feldmessungen durchgeführt und die Rechenmodelle verbessert. Die fundiertere Abschätzung führte 1973 zu einer verminderten, allerdings immer noch erheblichen Reduktion der Ozonschicht um 12%, die später noch mehrfach, insbesondere durch die Einbeziehung neuer Reaktionen und Kopplungen zwischen den einzelnen Reaktionszyklen bis zu unbedeutender Reduktion und sogar leichter Ozonzunahme korrigiert wurde (Fabian 1992).

Die NO_x -Chemie ist besonders unterhalb von etwa 40 km effektiv (Abb. 6) und erklärt den größten Teil des Ozonüberschusses der Chapman-Theorie. Natürliche Quelle der Stickoxide in der Stratosphäre ist N_2O , das durch mikrobiologische Prozesse in Böden und Wasser gebildet wird und dessen Produktion durch Stickstoffdüngung anthropogen beeinflusst ist. Schließlich erschienen 1974 die ersten Arbeiten zur ClO_x -Chemie (Stolarski und Ciccone 1974, Wofsy und McElroy 1974, Crutzen 1974b). Stolarski und Ciccone dachten an die Verbrennungsrückstände der Feststoffraketen für das Space Shuttle als anthropogene Cl- und ClX-Quelle. Natürliche Quelle von Cl-Verbindungen sind Vulkaneruptionen. Diese Quellen erwiesen sich aber als zu

schwach, um zu nennenswertem Ozonabbau zu führen. Dann erschien nur wenig später, im Juni 1974, Molinas und Rowlands Arbeit "Stratospheric sink of chlorofluoromethanes: Chlorine atoms-catalyzed destruction of ozone" (Molina und Rowland 1974).

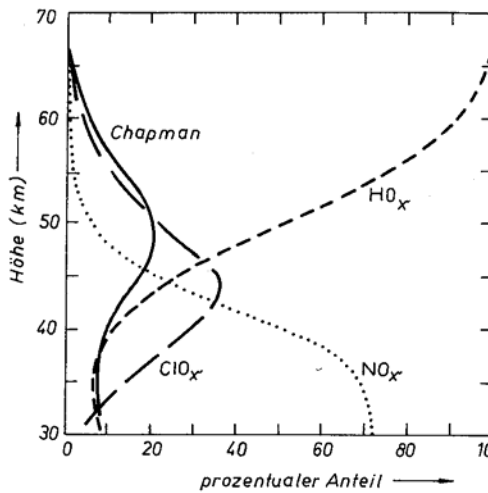


Abb. 6:
Prozentualer Anteil der Ozonabbauraten als Funktion der Höhe

Niemand vorher hatte angenommen, dass die Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW, engl. CFC, Handelsname Freon, F), seit den frühen 30er Jahren vielfältig und verstärkt und in zunehmendem Maß seit 1960 in der chemischen Industrie eingesetzt (Tab.5), eine nennenswerte Rolle in der Stratosphäre spielen könnten. Für Rowland, der erstmals 1972 auf einer Konferenz in Fort Lauderdale auf die FCKWs aufmerksam wurde, schien die Beschäftigung mit ihnen nichts mehr als eine interessante Idee zu sein, und Molina bekannte später: "We thought it would be a nice, interesting, academic exercise." (Roan 1989). Bis dahin waren die FCKWs einfach *die* idealen Chemikalien für die Industrie. Sie verhalten sich wie Edelgase. Sie sind geruch- und geschmacklos, nicht giftig, nicht brennbar, daher nicht explosiv, und nicht lösbar, so dass auch der sonst in der Atmosphäre sehr wirksame Prozess des Auswaschens und Ausregnehmens nicht wirksam werden kann. Durch Konvektion gelangen sie trotz ihrer Schwere allmählich auch in die Stratosphäre. Dort, zwischen etwa 20 und 40 km sind sie der starken UV-Strahlung in einem etwas durchlässigeren Bereich (von 175 bis 220 nm) zwischen den intensiven Schumann-

Gas	Chemische Formel	Quelle	Atmosph. Lebenszeit in Jahren ¹	Trend der Konzentration in % pro Jahr ²
Fluorkohlenwasserstoffe				
CFC-10	CCl ₄	Feuerlösch-, Lösungs-, Verschäumungsmittel	42	1 - 2
CFC-11	CCl ₃ F	Kühlmittel, Treibgas, Kunststoffverschäumung	50	5
CFC-12	CCl ₂ F ₂	dito	102	5
CFC-13	CClF ₃		640	5
CFC-14	CF ₄	Aluminiumindustrie		2
CFC-113	C ₂ Cl ₃ F ₃	Lösungsmittel Elektronikindustrie	85	10
CFC-114	C ₂ Cl ₂ F ₄		300	
CFC-115	C ₂ ClF ₅		1700	
Halone				
H-1211	CF ₂ ClBr	Feuerlöschmittel	20	20
H-1301	CF ₃ Br	Feuerlöschmittel	65	
H-2402	C ₂ F ₄ Br ₂			
Wasserstoffchlorfluorkohlenwasserstoffe				
HCFC-21	CHCl ₂ F			
HCFC-22	CHClF ₂	Kühlmittel	13	10 - 15
Sonstige				
Perfluoroethan	C ₂ F ₆	Aluminiumindustrie	10000	6

¹ nach WMO (1994)² Stand in etwa von 1984 vor der Unterzeichnung des Protokolls von Montreal 1987

Tabelle 5:

Künstliche Chlor-, Brom- und Fluorverbindungen in der Atmosphäre (Auswahl)

Runge-Absorptionsbanden von O₂ und der Hartley-Bande des Ozons ausgesetzt und dissoziieren. Die Radikale (Cl,Br,F) werden freigesetzt und der katalytische Ozonabbau beginnt. Abschätzungen ergaben einen Rückgang der Ozonkonzentration um 40% nahe 40 km (Abb. 6), sollte der FCKW-Verbrauch auf dem Stand von 1974 kontinuierlich fortgesetzt werden.

Die katalytischen Ozon-Abbaureaktionen laufen in der Atmosphäre aber nicht parallel und unabhängig voneinander ab, sondern sind miteinander eng gekoppelt (Fabian 1992).

Der erste Nachweis von FCKW in der Atmosphäre gelang James Lovelock, dem Begründer der Gaia-Hypothese, gaschromatisch mit einer Elektronenfalle 1970 über Irland (Lovelock 1971). Er fand für Chlortrifluormethan, CFC-11, eine Konzentration in der Größenordnung von 10⁻¹¹. Allerdings erkannte er nicht die schleichende Gefahr, die von diesen neuen Chemikalien ausging (Lovelock u.a. 1973). Im Frühjahr 1974 war die Konzentration von CFC-11 gegenüber Ende 1972 schon um 36% als Folge der wachsenden Produktion gestiegen (Fabian 1976). Es ist der hohen moralischen Verantwortung von Rowland, Molina und anderen zu danken, dass seit der Entdeckung des schädlichen Einflusses der FCKW eine ständige Debatte um Reduzierung bzw. vollständige Einstellung ihrer Produktion in den USA und international geführt wurde. Ein positives Ergebnis dieser Debatten war die Einstellung von Aerosolsprays auf FCKW-Basis in den USA im Oktober 1978 und wenig später in einigen anderen Ländern. Dennoch stieg die Produktion von FCKW – zu den 1974 meist verbreiteten CFC-10, 11 und 12 waren in der Folge weitere, z.T. auch als Ersatzstoffe – hinzugekommen (Tabelle 5). Wer weiß, wie lange es noch bis zu einer bindenden internationalen Vereinbarung über die Einschränkung und das Auslaufen der FCKW-Produktion gedauert hätte, wenn nicht Mitte der 80er Jahre ein völlig unerwartetes Phänomen beobachtet worden wäre: das antarktische "Ozonloch" (Abb. 7). Farman und Mitarbeiter (1985) vom British Antarctic Survey hatten die Messungen von Halley Bay, die mit dem IGY begonnen hatten, bis 1984 veröffentlicht. Sie gelten damit gemeinhin als dessen Entdecker. Allerdings war bereits im September 1984 auf einem internationalen Ozonsymposium ein Poster mit Messungen an der japanischen Antarktisstation Syowa Station (69°S) gezeigt worden, das einen drastischen Abfall des Ozongehalts auf etwa 200 Dobson-Einheiten im September/Oktober 1982 zeigte (Chubachi 1984, Fabian 1989). Abb. 7 signalisiert diesen Abfall zumindest bereits seit Mitte der 70er Jahre.

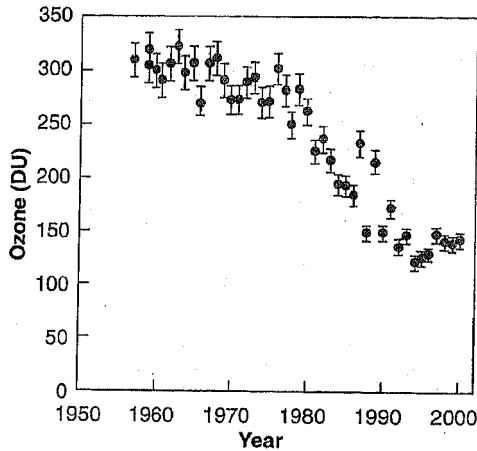


Abb. 7:
Gesamtozongehalt in Dobson-Einheiten (DU) über Halley Bay, Antarktis, (76°S) im Oktober seit 1956. 1 DU = 1×10^{-3} cm Ozonschichtdicke reduziert auf Normalbedingungen (1 atm, 273 K).

Die Entdeckung des Ozonlochs an einem Ort weit entfernt von anthropogenen Quellen und mit bis dahin unvorhergesagter Tiefe stimulierte sowohl weitere intensive Forschungstätigkeit als auch verstärktes politisches Handeln. Bereits im März 1985 wurde die Wiener Konvention verabschiedet, die weitere Forschung und den Austausch von Informationen über die Ozonabnahme anmahnte, aber noch zu keiner Vereinbarung über eine Reduktion der FCKW-Produktion führte. Dies wurde erst 1987 in Montreal in einem ersten Schritt erreicht mit in der Folge weiteren verschärfenden Maßnahmen (Tab. 6).

Das antarktische Ozonloch bildet sich im Frühjahr der Südhalbkugel in den Monaten September und Oktober aus und verschwindet mit zunehmendem Sonnenstand und Zusammenfall des in sich geschlossenen Polarwirbels sehr kalter Luft. Ozonsondenmessungen zeigten die stärkste Ozonabnahme zwischen etwa 12 und 23 km, genau dort, wo ansonsten maximale Ozonkonzentrationen beobachtet werden und die ClO_x -Chemie (Abb. 6) ineffektiv ist. Die Existenz von ClO- und OCIO-Radikalen in wesentlich höherer Konzentration als vorhergesagt und die negative Korrelation zwischen NO_2 und ClO im Polarwirbel wiesen auf andere wirksame chemische Prozesse hin als bisher angenommen worden war. Die Bildung von Wolken in der kalten polaren Stratosphäre (Abb. 8) legte heterogene chemische Prozesse an den Wolkenteilchen nahe. Tatsächlich werden inaktive Halogenver-

1. Protokoll von Montreal 1987

CFCs (11,12,113,114,115) Referenzproduktion des Jahres 1986
 Ende 1994: 20% Reduktion
 Ende 1999: 50% Reduktion

2. Zusatz zum Montreal-Protokoll (London Amendment 1990)

CFCs (13,111,112,211, 212,213,214,215, 216,217) Referenzproduktion des Jahres 1989
 1993: 20% Reduktion
 1997: 85% Reduktion
 ab 2000: Auslaufen der Produktion

Halone (1211,1301, 2402) 1992: Einfrieren auf Niveau von 1986
 1995: 85% Reduktion
 2000: Auslaufen der Produktion

CFC-10 (CCl₄) Referenzproduktion des Jahres 1989
 1995: 85% Reduktion
 2000: Auslaufen der Produktion

Methylchloroform (CH₃CCl₃) 1993: Einfrieren der Produktion
 1995: 30% Reduktion der 89er Produktion
 2000: 70% Reduktion
 2005: Auslaufen der Produktion

3. Weitere Verschärfung des Montreal-Protokolls (Kopenhagen Amendment 1992)

CFCs Ende 1995: Auslaufen der Produktion

Halone Ende 1993: Auslaufen der Produktion

CCl₄ Ende 1995: Auslaufen der Produktion

Methylchloroform Ende 1995: Auslaufen der Produktion

Methylbromid (CH₃Br) Ende 1994: Einfrieren der Produktion

HCFCs Referenz: Produktion des Jahres 1989
 Ende 2004: 35% Reduktion
 Ende 2014: 90% Reduktion
 Ende 2019: 99,5% Reduktion
 Ende 2029: Auslaufen der Produktion

Tabelle 6:

Zeitplan der internationalen Vereinbarungen zur Reduktion der Produktion von Substanzen, die die Ozonschicht angreifen (nach Bojkov 1995)

bindungen wie HCl , ClONO_2 und BrONO_2 an der Oberfläche der Wolkenteilchen in aktive Verbindungen (Cl_2 , ClO , $2\text{Cl}_2\text{O}_2$, BrO , u.a.) umgewandelt, die bei Sonnenbestrahlung den Katalyseprozess in Gang setzen und zu dem verstärktem Ozonabbau führen. Polare stratosphärische Wolken treten im antarktischen Winter wegen der dort erreichten niedrigen Temperaturen im abgeschlossenen polaren Wirbel regelmäßig auf, in der Arktis, wo sich ein ständiger Polarwirbel nicht ausbilden kann, nur gelegentlich.

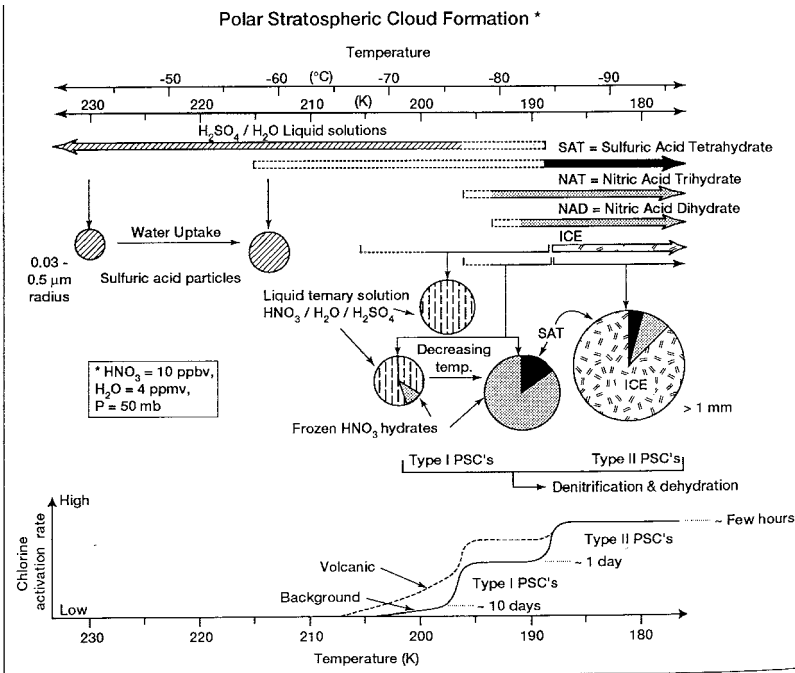


Abb. 8: Schema der Bildung polarer stratosphärischer Wolken (PSC) als Funktion der Temperatur (oben) und Chloraktivierung an PSC in Abhängigkeit von der Temperatur (unten). An den immer vorhandenen Schwefelsäuretröpfchen in der unteren Stratosphäre, deren Existenz erst in den frühen 60er Jahren durch Christian Junge nachgewiesen worden war (Junge u.a. 1961), bilden sich zunächst ternäre unterkühlte Lösungen aus $\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2\text{SO}_4$ bzw. bei Fehlen von HNO_3 SAT-Teilchen ($\text{H}_2\text{SO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$). Beim Gefrieren der Teilchen werden die HNO_3 -Hydrate stabil. Polare stratosphärische Wolken erster Art (PSC I) aus NAT- ($\text{HNO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) oder/und NAD-Teilchen ($\text{HNO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) bilden sich über dem Frostpunkt bei 195K. Beim Eisfrostpunkt von 188K bilden sich PSC vom Typ II. Die Chloraktivierung setzt an den Oberflächen der PSC-Teilchen ein.

Signifikanter Ozonrückgang wurde aber nicht nur in Polargebieten registriert. Auch in mittleren Breiten ist die Ozonabnahme, insbesondere im Winter mit etwa 6% pro Dekade, beträchtlich.

Die stratosphärische Konzentration anthropogener Cl-Verbindungen ist gegenwärtig als Folge der internationalen Vereinbarungen bei etwa 4 ppbv stabil (WMO 2001). Diese Konzentration reicht aus, um bei geeigneten meteorologischen Bedingungen ernsthaften Ozonabbau zu erzeugen. Ozondefizite der gegenwärtigen Größenordnung sind in Anbetracht der langen Lebenszeit der Cl-Verbindungen über Jahrzehnte hinaus zu erwarten.

Man muss es als einen außergewöhnlichen Glücksumstand bezeichnen, dass die chemische Industrie Chlor- und nicht Bromverbindungen einsetzte, da Bromine zu ihrer Aktivierung keine heterogene Chemie benötigen. Ein Br-Atom ist damit um etwa 100-mal gefährlicher für Ozon als ein Cl-Atom (Crutzen 1974b, Wofsy u.a. 1975).

Es sei an dieser Stelle ein Exkurs über die Erforschung der Planetenatmosphären erlaubt. Seit den 60er Jahren waren die Kenntnisse über die Planetenatmosphären durch Einsatz modernster Mittel explosionsartig gewachsen. Die vergleichende Analyse der Planetenatmosphären einschließlich der Erdatmosphäre weitete auch für die Meteorologie den Blick (z.B. Kondratyev und Hunt 1982, Levine 1985, Prinn und Fegley Jr. 1987). Tatsächlich wurde die Fotochemie von Chlorverbindungen (HCl, Cl, ClO, OCIO) erstmals in der Venusatmosphäre vor den o.a. Arbeiten untersucht¹ (Prinn 1971). Auch die Bildung von Schwefelsäuretröpfchen aus OCS wurde in der Venusatmosphäre vor entsprechenden Arbeiten für die Erdatmosphäre durchgeführt (Prinn 1973). Crutzen (1976) hatte erst drei Jahre danach gezeigt, dass die Reaktionen mit OCS, die in der Venusatmosphäre ablaufen, dieselben sind, die in der Erdatmosphäre wesentlich an der Bildung der von Junge u.a. (1961)² entdeckten stratosphärischen Dunstschicht beteiligt sind³.

-
1. Offenbar liefen die entsprechenden Forschungen zu dieser Zeit unabhängig voneinander.
 2. Christian Junge (1952) hatte gefunden, dass die Größenverteilung des atmosphärischen Aerosols in einem weiten Größenbereich einem Potenzverteilungsgesetz $dN/d\log r \sim r^{-\alpha}$ folgt. Dieses Gesetz ergibt sich im Gleichgewichtszustand zwischen aerosolbildenden und aerosolvernichtenden Prozessen. Die individuellen Aerosolkomponenten sind i. A. logarithmisch normalverteilt (z.B. Whitby 1978, Slinn 1883).
 3. Die entsprechende Arbeit von Prinn (1973) war Crutzen bekannt.

4. Nuklearer Winter

Seit Anfang der 80er Jahre wurden, initiiert durch die Umweltzeitschrift AMBIO der Königlich-Schwedischen Akademie der Wissenschaften, international Forschungen zu den möglichen Folgen einer globalen Auseinandersetzung unter Einsatz von Kernwaffen durchgeführt. Vorher, 1975, war die National Academy of Sciences der USA vom US-Amt für Rüstungskontrolle und Abrüstung (ACDA) mit einer Studie der weltweiten Konsequenzen eines massiven Kernwaffeneinsatzes beauftragt worden. Das war noch mitten in der Periode des kalten Krieges und die Gefahr eines Kernwaffenkrieges keineswegs gebannt. Paul Crutzen, der zur Ambio-Aktivität erst überredet werden musste (WMO 1998b), dachte zunächst an eine aktualisierte Abschätzung eines möglichen Ozonabbaus durch NO_x , das in den heißen Feuerbällen energiereicher Kernwaffenexplosionen gebildet und in die Stratosphäre transportiert wird. Johnston und Mitarbeiter (1973) hatten die Produktionsrate von Stickoxid mit bis zu 10^{32} NO-Molekülen pro Megatonne TNT abgeschätzt. Bei einem geschätzten Waffenarsenal von 125 000 Megatonnen TNT Anfang der 80er Jahre (Harwell 1984) ergibt das 10^{37} NO-Moleküle. Nach Hampson (1974) würde eine Größenordnung von 10^{35} NO-Molekülen entsprechend 5000 Megatonnen TNT ausreichen, um 50% des Ozons der Nordhemisphäre zu vernichten.

In der Öffentlichkeit waren diese besorgniserregenden Abschätzungen weitgehend unbekannt. Erst die AMBIO-Studie (AMBIO 1982) mit ihrem komplexen interdisziplinären Ansatz führte zu einer entsprechenden Beachtung. In dieser Studie hatten Crutzen und Birks (1982) eine starke und anhaltende Trübung der Atmosphäre als Folge gewaltiger Waldbrände diskutiert. Aufbauend auf dieser Arbeit hatten Turco u.a. (1983) eine umfangreiche Analyse der Rauchmengen und -eigenschaften von Stadtbränden vorgenommen und deren Wirkung auf die Atmosphäre mit einem Strahlungskonvektionsmodell (siehe Abschnitt 6) untersucht. Danach sollten die durchschnittlichen Temperaturen über Land innerhalb von ein bis zwei Wochen für mehrere Monate auf -25°C sinken und das Strahlungsangebot auf unter 5% der normalen Strahlungsleistung abnehmen. Zu ähnlichen Schlussfolgerungen kamen auch andere Studien (Svirezhev u.a. 1990). Der IX. Meteorologische Weltkongress (1983) fasste auf der Grundlage eines vom Meteorologischen Dienst der DDR unterbreiteten Vorschlags den Beschluss einer offiziellen Einschätzung durch die WMO (W. Böhme Jan. 2002, pers. Mitt.). Die möglichen klimatischen Folgen eines Kernwaffenkrieges wurden in ihren Auswirkungen interdisziplinär breit diskutiert (Harwell 1984, Har-

well und Hutchinson 1985, Pittock u.a. 1986, Carl 1990). Das Scientific Committee On Problems of the Environment (SCOPE) initiierte das ENUWAR-Projekt (Environmental Consequences of Nuclear War), dessen Ergebnisse um die Jahreswende 1985/86 in einem zweibändigem Report SCOPE 28 veröffentlicht wurden. Schließlich folgte 1988 ein gemeinsames Statement von UN und SCOPE. Die darin aufgezeigten Konsequenzen eines Atomkrieges – Klimastörung erheblichen Ausmaßes infolge stark reduzierter solarer Einstrahlung, empfindlichem Temperatursturz und wesentlicher Änderung der Niederschlagsverhältnisse im kontinentalem Maßstab über mehrere Monate, Zerstörung der Ozonschicht und damit verstärkte biologisch schädliche UV-B-Strahlung, totale Ernteausfälle bzw. erhebliche Ernteeinbußen, globaler Fallout und lokale Vergiftung von Luft, Wasser und Boden, Zusammenbruch der Energieversorgung, Kommunikation und weiterer zivilisatorischer Infrastrukturen – machten deutlich, dass die indirekten Folgen einer solchen Auseinandersetzung eine wesentlich größere Gefahr für die Menschheit darstellen würden als die direkten Kriegseinwirkungen und nicht nur die kriegführenden Parteien, sondern der gesamte Planet davon betroffen wäre.

Es ist zweifellos den sorgfältigen, wissenschaftlich fundierten Erkenntnissen, den nachfolgenden wissenschaftspolitischen Aktivitäten und der breiten Publikationstätigkeit zu danken, dass die latente Gefahr eines Atomkrieges seitdem erheblich gemindert werden konnte¹.

5. Dynamische Meteorologie – Wettervorhersage

Nie, wie der Fortschritt der Wissenschaft
auch sein möge, werden ernsthafte Wissenschaftler,
die sich um ihren Ruf sorgen,
die Vorhersage des Wetters versuchen.

François Arago (1845)

Die Wettervorhersage ist das ureigenste Problem der Meteorologie. Mathematisch ist es ein Anfangsrandwertproblem. Kennt man zu einem Zeitpunkt t_0 den Zustand der Atmosphäre, dann lässt sich vom Laplaceschen Standpunkt der atmosphärische Zustand zur Zeit $t_0 + \Delta t$ bei adäquater Anwendung

1. Von den nationalen meteorologischen Gesellschaften reagierten allerdings nur zwei, die American Meteorological Society und die Meteorologische Gesellschaft in der DDR, mit entsprechenden Resolutionen auf diese Befunde.

der physikalisch-mathematischen Gesetze berechnen¹. Die Prognose setzt eine gute Analyse voraus. Die Crux der Meteorologen bestand über Jahrhunderte darin, dass weder die zu Grunde liegenden mathematisch-physikalischen Gesetze noch die entsprechenden Anfangswerte zur Verfügung standen. Erfolg bedurfte nach Marc Aurel (Selbstbetrachtungen) der Hilfe der Götter *und* glücklicher Umstände. Erschwerend kommt als weitere notwendige Bedingung das diffizile Problem zeitkritischer Bearbeitung. Eine Vorhersage ist nur dann von Nutzen, wenn sie rechtzeitig gegeben wird.

Eine adäquate Kenntnis des Anfangszustandes setzt ein entsprechendes meteorologisches Messnetz, und zwar in drei Dimensionen, voraus, die zeitkritische Bearbeitung eine effiziente Datenübermittlung und -verarbeitung. Beide Komponenten erfordern den modernsten Stand der Wissenschaft und Technik. Die Gewährleistung dieser Voraussetzungen war und ist das erklärte Ziel der in Abschnitt 2 erwähnten Weltwetterwacht. Sicher gilt nicht nur für die Meteorologie, aber vielleicht hier doch in besonderem Maße eine Feststellung des norwegischen Meteorologen Thor Bergeron (1959), dass nur der Gleichschritt im Fortschreiten von Messung, Theorie und Technik fundamentalen Erkenntnisgewinn bringt.

Die mathematisch-physikalischen Grundlagen der Wettervorhersage lagen zu Beginn des vorigen Jahrhunderts vor: die prognostischen Navier-Stokesschen Bewegungsgleichungen für die drei Komponenten des Windes, die Massenhaushaltsgleichung (Kontinuitätsgleichung) als prognostische Gleichung für die Luftdichte, die Feuchtehaushaltsgleichung als prognostische Gleichung für die spezifische Feuchte, der erste Hauptsatz der Thermodynamik, aus dem die Haushaltsgleichung für fühlbare Wärme als prognostische Gleichung der potentiellen Temperatur abgeleitet werden kann, und schließlich zwei diagnostische Gleichungen, die Gasgleichung und die Poisson-Gleichung zur Berechnung der potentiellen Temperatur aus Luftdruck und Temperatur. Die prognostischen Gleichungen sind nichtlineare partielle Differentialgleichungen, bei denen keine exakten analytischen Lösungen existieren. Lösungen können nur näherungsweise gefunden werden. Wenn auch nicht explizit, so lagen diese Gleichungen auch der traditionellen synop-

1. Es ist interessant, dass bereits 1781 Thomas Bugge, Professor für Physik vor der Kgl. Danske Videnskabernes Selskab, der Dänischen Königlichen Wissenschaftlichen Gesellschaft, konstatierte: „If meteorology ever can reach any certainty, if it can ever be included in the natural sciences, and if the meteorologists ever could find some cycles in the return of the weather, then they might be able to simulate the astronomers to a certain degree by computing the weather for the coming time.“ (zitiert nach Wiin-Nielsen 1991).

tischen Arbeitsweise zu Grunde, die mit Hoch- und Tiefdruckgebieten, Fronten und Luftmassen und deren Verlagerung bis weit in die 70er Jahre im wesentlichen in der täglichen Praxis der Wetterdienste mit Erfolg betrieben wurde. Daneben hatte sich die numerische Wettervorhersage in den letzten Jahrzehnten in einer Qualität entwickelt, dass sie heute in einer sinnvollen Kombination von Mensch und Maschine das Fundament auch der operativen täglichen Vorhersagen bildet.

Allgemein gilt als Grundlage der numerischen Wettervorhersage die Arbeit von Vilhelm Bjerknes, die er im Jahr 1904 in der Meteorologischen Zeitschrift veröffentlichte (Bjerknes 1904). Diese Arbeit stellte die entsprechenden Gleichungen zusammen und war ihrer Zeit weit voraus. Das meteorologische Beobachtungsnetz bestand nur aus Landstationen, und die dritte Dimension war noch nicht erschlossen. Dies geschah erst in den 30er Jahren durch Einführung der Radiosonden. Bis zur Einführung elektronischer Rechenmaschinen musste eine numerisch erstellte rechtzeitige Wetterprognose ein Traum bleiben (Richardson 1922)¹.

John von Neumann wählte 1946 das Problem der numerischen Wettervorhersage, um die neu entwickelten elektronischen Rechner zu testen². Eine der

-
1. Der englische Mathematiker Lewis Fry Richardson, rechnete mit seiner Frau in echter Sisyphusarbeit elf Jahre, um für den größten Teil Europas mit einer räumlichen Auflösung von 5 Breiten- und 10 Längengraden sechsstündige Vorhersagen der Luftdruckänderung zu berechnen. Sie erhielten Änderungen von 145 hPa. Tatsächlich lagen sie durchgehend unter 1 hPa. In der Rückschau ist dieses Ergebnis erklärbar: Richardson rechnete mit den vollständigen Bewegungsgleichungen, die auch den meteorologischen Lärm enthielten, d.h. die meteorologisch unwichtigen und störenden Schall-, Schwere- und Gravitationswellen. Nach Richardsons Schätzung wären in einer Wetterfabrik 64 000 Leute nötig, um das Wetter mit der gleichen Geschwindigkeit zu berechnen, mit der es eintritt. Irgendwie scheint er aber dennoch ein wenig Hoffnung gehabt zu haben: „Perhaps some day in the dim future it will be possible to advance the computations faster than the weather advances and at a cost less than the saving to mankind due to the information gained. But this is a dream.“
 2. Von Neumann schlug im Mai 1946 die Bildung einer meteorologischen Gruppe im Electronic Computer Project der US Navy vor: “The objective of this project is an investigation of the theory of dynamic meteorology in order to make it accessible to high-speed, electronic, digital, automatic computing, of a type which is beginning to be available in the future. It is also expected that these investigations will give indications as to what further observations are necessary – both of the laboratory type and of the field type – in order to make theoretical work, that is supported by such high speed computing, more fully effective” (zitiert nach Platzman 1979).

Aufgaben des von ihm initiierten Princeton Meteorology Project¹ war die Darstellung der meteorologischen Grundgleichungen in einer Form, die für eine numerische Behandlung geeignet war. Dazu mussten die vollständigen hydrodynamischen Bewegungsgleichungen vom Ballast des 'meteorologischen Lärms' – höherfrequente Schall- und Schwerewellen mit wenig Relevanz für die meteorologische Entwicklung, aber Ursache numerischer Instabilitäten – befreit werden. Basierend auf den Arbeiten von Carl Gustav Rossby (1858-1957), einem der führenden Meteorologen der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts, der maßgeblich an der Entstehung und Fortgang dieses Projekts beteiligt war, wurden von Charney (1948) und Eliassen (1949) die quasigeostrophischen Vorhersagegleichungen abgeleitet. Die erste numerische Anwendung dieser Gleichungen wurde 1950 mit dem einfachsten atmosphärischen Modell als Training, einem barotropen² Einschichtmodell der mittleren Troposphäre in 500 hPa, realisiert (Charney, Fjørtoft und von Neumann 1950). Ein solches Modell transportiert nur vorhandene Druckgebilde, lässt aber keine meteorologischen Neuentwicklungen wie die Entstehung neuer Tiefs (Zyklogenese) zu. Es war daher ziemlich überraschend, dass bereits dieses einfache barotrope Modell ohne jegliche grundlegenden atmosphärisch-physikalischen Prozesse wie Strahlung, Verdunstung, Kondensation, u.a. befriedigende großräumige 12 und 24-stündige Vorhersagen der 500 hPa-Druckfläche lieferte. Offenbar die ersten wirklichen numerischen Vorhersagen, d.h. rechtzeitig unter operationellen Bedingungen mit Dateneingang-, prüfung und decodierung, objektiver Analyse und weiterer Schritte, waren zwei 24-Stunden-Vorhersagen für den 23. und 24. März 1954, die in dem von Rossby gegründeten International Meteorological Institute in Stock-

-
1. Leiter der meteorologischen Gruppe des Princeton Meteorology Project war Jule Gregory Charney (1917-1981). Namhafte Meteorologen aus mehreren Ländern (siehe z.B. Platzman 1979, Smagorinsky 1983, Wiin-Nielsen 1991) waren involviert. Weithin bekannt ist international nur die Entwicklung in den westlichen Ländern. Dabei gab es eine verblüffend parallele Entwicklung in der Sowjetunion, basierend auf den Arbeiten von I.A. Kibel (Phillips u.a. 1960).
 2. In einer barotropen Atmosphäre laufen Isobaren und Isothermen parallel. Es gibt daher im Unterschied zur baroklinen Atmosphäre keine vertikale Windscherung, keine Vertikalbewegungen und keine horizontale Divergenz.

holm erstellt wurden¹ (Wiin-Nielsen 1991). Die Voraussetzung der Quasi-Geostrophie, bei der der Wind als Folge des Gleichgewichts zwischen Druckgradient und Corioliskraft nahezu parallel zu den Isobaren strömt, bedeutete wegen der verschwindenden Corioliskraft am Äquator eine Beschränkung des Prognosegebiets auf mittlere und polare Breiten.

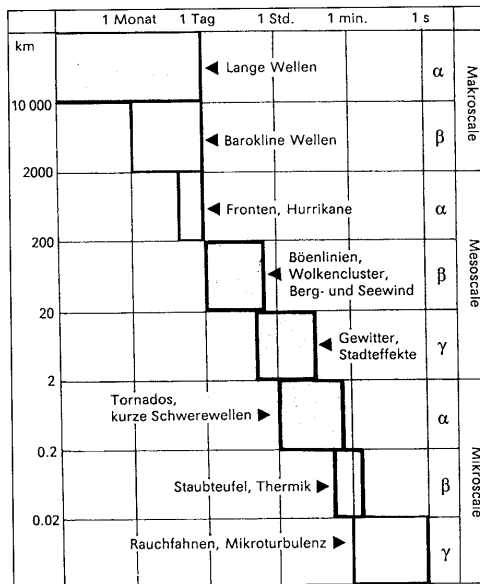


Abb. 9:

Raum-Zeit-Diagramm meteorologischer Phänomene und Prozesse nach Orlandi (1975). Die Realität besetzt nur den Diagonalbereich vom potentiell möglichen Bereich über 15 Größenordnungen im Raum und über 10 Größenordnungen in der Zeit. Prognostisch volkswirtschaftlich relevant ist der Bereich ab $t = 0$ (Kürzestfristprognose 0 bis 2 Stunden) im gesamten Meso- bzw. sogar Mikro α -Bereich (Tornados) bis zur Langfrist- (Monate bis Jahre) und Klimaprognose (Jahrzehnte) für den Meso- und Makroscale.

- Die Integrationen wurden über einem Gebiet, das vom nordöstlichen Teil Nordamerikas bis Europa mit südlicher Begrenzung über Nordafrika reichte, mit 20x20 Gitterpunkten im Abstand von etwa 300 km durchgeführt. Die erforderliche Zeit zur Erstellung der Prognose betrug 6 h 30 min. Sie setzte sich aus folgenden Einzelposten zusammen: Prüfung und Zeichnen der Daten 1h 30 min, Analyse der 500 hPa-Karte 1h 30 min, Einlesen der Werte an den 440 Gitterpunkten 1h 20 min, Lochen der Eingangsdaten 40 min, Überprüfung und Korrektur 20 min, Rechnen der Vorhersage 40 min, Zeichnen und Analyse der Vorhersage 30 min. Eine maschinelle objektive Analyse konnte die benötigte Zeit wesentlich reduzieren (Wiin-Nielsen 2001).

Die zunehmende Computerkapazität gestattete bald die Anwendung barokliner Modelle für eine zunehmende Anzahl atmosphärischer Schichten. Modellstruktur und Datenangebot waren dem Makro β -Bereich, d.h. dem Maßstabbereich der baroklinen Wellen angepasst (Abb. 9). Die numerische Kurzfristvorhersage im Maßstab Makro β war das wesentlichste Resultat der dynamischen Meteorologie der 50er und ersten Hälfte der 60er Jahre (Kluge 1984, Bengtsson 1999). Im Makrobereich laufen die meteorologischen Prozesse im wesentlichen quasigeostrophisch und hydrostatisch ab, im mikrometeorologischen Bereich nicht geostrophisch und nicht hydrostatisch bei vernachlässigbarer Corioliskraft. Die hydrostatische Näherung muss bereits für Meso γ aufgegeben werden. Die Vorhersagemodelle unterscheiden sich daher qualitativ für meteorologische Prozesse in den verschiedenen Maßstabsbereichen, und zwar sowohl in ihrer Physik als auch in Datenanforderung und -bearbeitung (Tabelle 7). Modell- und Datenprobleme sind maßstabsspezifisch.

Systemparameter	Makro	Mikro
<i>Maßstäbe</i>		
Vorhersagezeitraum	> 12 h	0-12 h
Prozessmaßstab	> 2000 km	~ 2000-2 km
Einzugsbereich	global oder hemispärisch	regional oder lokal
<i>Daten</i>		
zeitliche Auflösung	3-12 h	< 1 h
räumliche Auflösung	~ 100 km	~ 10-1 km
Datenumfang	~ 10^6 bits/h	~ 10^8 bits/h
<i>Informationsverarbeitung</i>		
Übertragungsgeschwindigkeit	~ 1h – 10 min	~ 1 min – 1s
Arbeitsteilung*	WMC, RMC, (NMC)	NMC und subnationale (regionale) Institute
<i>Modelle</i>		
	globale und hemispärische	regionale, eingebettet in großräumige

* World Regional und National Meteorological Center nach WMO-Standard

Tabelle 7:

Vergleich makro- und mesometeorologischer Vorhersagesysteme (nach Kluge 1986)

Für die Modellierung atmosphärischer Prozesse gilt die Faustregel: Gitterabstand d der Modelle zu Maßstab D der zu modellierenden Prozesse etwa 1:8,

d.h. $d \sim 100$ km für Meso α (z.B. Fronten, Hurrikane), $d \sim 10$ km für Meso β (z.B. Regenbänder, Böenlinien) und $d \sim 1$ km für Meso γ (z.B. Gewitterzellen, clear air turbulence (CAT)). Satellitendaten können die Datenanforderungen für den Mesobereich i. A. nicht befriedigen (Abb. 10). Deshalb war und ist die Entwicklung leistungsfähiger bodengebundener indirekter passiver (Fourierspektroskopie, Mikrowellenradiometrie) wie aktiver Sondierungsverfahren (Radar, Lidar), die seit Mitte der 70er Jahre verstärkt einsetzte, für den weiteren Fortschritt in dieser Richtung existentiell (Clifford u.a. 1994, Wilczak u.a. 1996). Besonders perspektivisch erscheinen Doppler-Radar für den dreidimensionalen Windvektor und neuerdings passive Mikrowellenradiometrie für Feuchte- und Flüssigwasserprofile (Güldner und Spänkuch 2001).

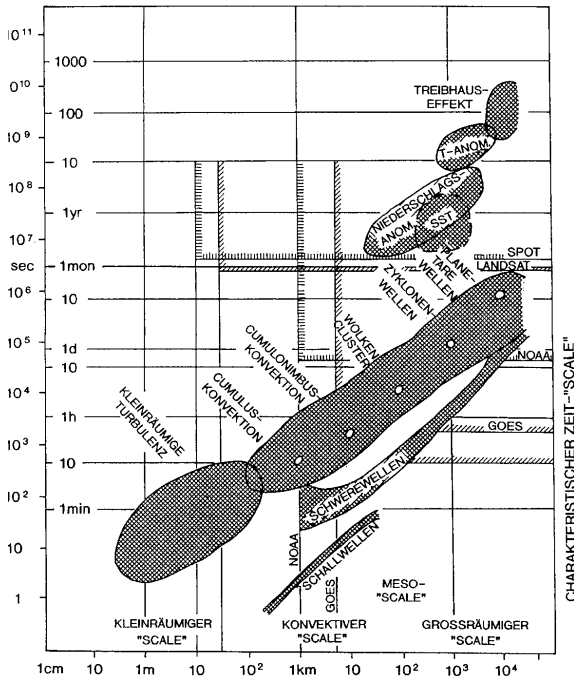
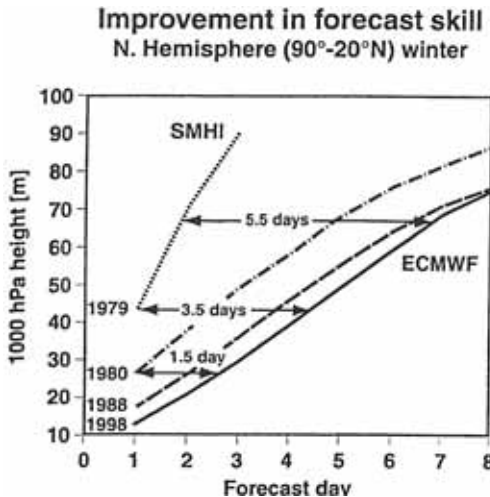


Abb. 10:

Monitoring meteorologischer Phänomene und Prozesse durch Satelliten. Fernerkundungssatelliten wie LANDSAT und SPOT mit hoher räumlicher Auflösung aber niedriger Wiederholfrequenz sind für meteorologische Prozessüberwachung nicht geeignet. Für geostationäre Satelliten (wie GEOS) sind zwei Zeitbereiche gezeigt, 1 h und 10 min. (Spänkuch 1994).

Zunächst setzte die Entwicklung der numerischen Meteorologie aber in die andere Richtung ein. Einige meteorologische Großzentren begannen 1979 bis 1981 mit dem Vorstoß in den unteren Bereich von Makro α , der Prognose des Temperatur- und Windfeldes mittels hydrodynamischer Modelle bis eine Woche im voraus für die mittleren Breiten. Die entsprechenden Voraussetzungen waren durch die Entwicklung der Rechentechnik, durch zunehmende Behandlung atmosphärenphysikalischer Prozesse und durch die während des First Global GARP Experiment (FGGE) 1977/79 in globalem Maßstab kombinierte Erprobung zahlreicher, z. T. neuer Messverfahren, von denen sich vor allem Bojen und kommerzielle Flugzeuge als Messplattformen besonders kostengünstig erwiesen, geschaffen worden. Die Abbildungen 11 und 12 und die Tabellen 8 und 9 demonstrieren Entwicklung und erreichten Stand. Die Modelle beschränkten sich nicht mehr auf die Troposphäre, sondern bezogen zunehmend immer höhere Niveaus der Atmosphäre ein (Tab. 9). Die letzte Version von T319 reicht bis in die Mesosphäre.



Gepunktet: Fehlerwachstumskurve des operationellen Modells des Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI), ein quasigeostrophisches 3-Schichtenmodell. Der rms-Fehler wuchs 1979 von 40m am Tag 1 auf über 90m am Tag 3.

Übrige Kurven: dasselbe für das European Center for Medium Weather Forecasting (ECMWF). Ein rms von 40m wird 1998 erst am Tag 4,5 erreicht (nach Bengtsson 1999).

Abb. 11:

Entwicklung der Prognoseleistung ab 1979 für die Höhe der 1000 hPa-Fläche für den nordhemisphärischen Winter (20°-90°N).

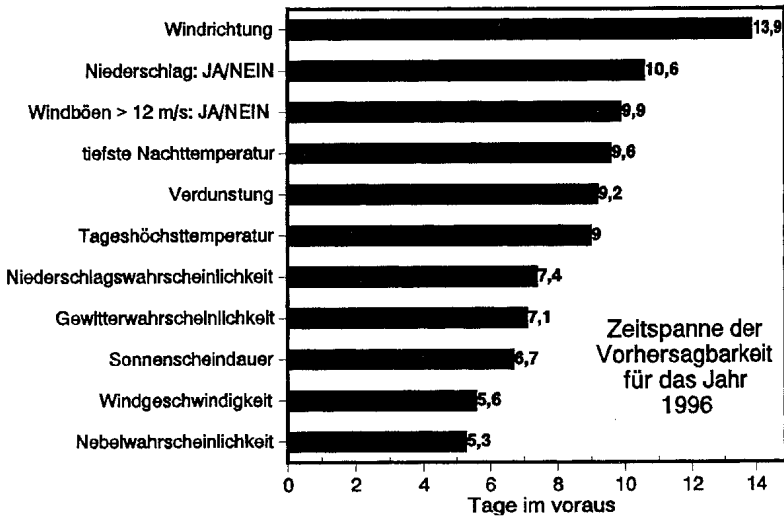


Abb. 12:

Zeitspanne der Vorhersagbarkeit einiger meteorologischer Elemente und Ereignisse für Mitteleuropa, Stand 1996. Eine Vorhersage gilt als nützlich, wenn sie über der Persistenz bzw. über der Klimaaussage liegt (Balzer u.a. 1998).

Rechner	Besk, Schweden	Fujitsu VPP 700 (16 Proz.)
Modell	MISU/MVC (1954)	ECMWF (1998)
Parameter	1 Schicht, regional	31 Schichten, global (T213)
Variablenanzahl	1	~ 200
Berechnungen/Tag	1200	3×10^7
Rechenzeit	3×10^7	5×10^{12}
Vorhersagezeit	(40 bit fix number)	(64 bit float number)
	25 min	6 min*
	1 Tag	6-9 Tage

Tabelle 8:

Modell- und Rechnervergleich der numerischen Wettervorhersage 1954 und 1998 (Bengtsson 1999)

Modell	Anzahl der Schichten	Oberste Grenze (hPa)
T63	17	25
T106	19	10
T213	31	10
T319	31	10
T319*	60	0,1

*im Oktober 1998 operationell noch nicht implementiert.

Tabelle 9:

Entwicklung der spektralen Modelle am ECMWF von 1993 bis 1998 (Bengtsson 1999)

Gleichzeitig erfolgte eine Verringerung des horizontalen Gitterpunktabstands. Die erhöhte räumliche Auflösung ist für die Beschreibung der Phasengeschwindigkeit und der dreidimensionalen Strömung im Makro β -Maßstab nicht erforderlich. Sie wird aber benötigt, um die nichtlineare Wechselwirkung der Prozesse unterschiedlichen Maßstabs zu erfassen. Nach Abb. 11 verringert sich die Ausdehnung des Prognosezeitraums pro Zeiteinheit, ein Hinweis auf eine Annäherung an die Grenze der Vorhersagbarkeit. Edward Lorenz (1963) hatte in seiner berühmten Arbeit über ein stark vereinfachtes Konvektionsmodell den nach ihm benannten Attraktor gefunden und eine prinzipielle Grenze der Vorhersagbarkeit für chaotische Systeme postuliert. Diese Arbeit erwies sich nicht nur für die Meteorologie bedeutsam sondern war grundlegend für die Chaostheorie und deren Anwendung. Nach Lorenz (1969, 1985) haben nicht nur im kleinsten Maßstab vorhandene Störungen oder Ungenauigkeiten Einfluss auf die Entwicklung in den größeren Maßstäben, bildhaft ausgedrückt durch den von ihm geprägten Schmetterlingseffekt, sondern es ergibt sich auch umgekehrt ein gesetzmäßiges Wachstum einer nur im niederwelligen Wellenlängenbereich vorhandenen Störung in den größerwelligen Bereich. Die Konsequenz ist ein i. A. geringerer Vorhersagezeitraum für kleiner- als für größerräumige Prozesse. Letztendlich sind auch die in Abb. 12 dargestellten Unterschiede in der Vorhersagedauer Ausdruck dieses Verhaltens.

Der aufgezeigte Fortschritt ist das Ergebnis einer generellen Verbesserung des Vorhersagesystems in allen seinen Komponenten (Benutzung allgemeinerer Formen der grundlegenden Gleichungen, verbesserte numerische Lösungsverfahren, erhöhte Auflösung, verbesserte Darstellung physikalischer Prozesse, verbessertes Beobachtungssystem, verbesserte Nutzung der Beobachtungen). Insbesondere die als Datenassimilation bezeichnete Nutzung der Beobachtungen aus den unterschiedlichsten Quellen, die in Qualität,

Auflösung, Detailliertheit außerordentlich heterogen sind und asynoptisch angeboten werden, ist eine besonders kritische Systemkomponente. Demgegenüber scheint die verbesserte Beobachtungstechnik für den Erfolg seit den frühen 80er Jahren eine untergeordnete Rolle zu spielen. Die Satellitensysteme wurden bezüglich der für die Wetteranalyse und –prognose entscheidenden Parameter bisher nicht wesentlich verbessert¹, und das konventionelle Messnetz von Radiosonden- und Bodenstationen, vor allem der Wetterschiffe, erfuhr und erfährt sogar eine empfindliche Reduzierung.

Als Folge der Abhängigkeit der Vorhersage von der prinzipiell begrenzten Genauigkeit der Anfangswerte werden seit Anfang der 90er Jahre Ensembleprognosen erstellt, wobei entweder dasselbe Vorhersagemodell mit leicht veränderten Anfangswerten gerechnet wird und/oder die Vorhersagen verschiedener Rechenzentren benutzt werden. Dabei zeigte sich, dass es in der Atmosphäre besonders kritische Regionen gibt, wo auf eine eingebrachte Störung empfindlich reagiert wird, und unkritischere Gebiete mit geringer Nachwirkung. Auf ein solch differenziertes Verhalten der Atmosphäre hatte bereits Marchuk (1976) hingewiesen. Für die endgültige Prognose orientiert man sich in der Regel am Mittelwert der Ensembleprognose, der i. A. mit zunehmendem Vorhersagezeitraum die vernünftigste Prognose liefert (Balzer u.a. 1998). Die Streuung der Ensembleprognose ist bisher allerdings entgegen den Erwartungen als ein Maß der Güte der Vorhersage nicht geeignet.

Mit der Einführung der Ensembleprognose geschah auch der Abschied von der, dem chaotischen Verhalten der Atmosphäre nicht angepassten, deterministischen Vorhersage zu einer probabilistischen Prognose.

6. Klimatologie

Das Klima ist die statistische Gesamtheit der atmosphärischen Zustände und Prozesse in ihrer raumzeitlichen Verteilung (Bernhardt 1987). Grundvoraussetzung der Klimatologie sind daher lange Messreihen. Erstellen und Analysieren geeigneter Messungen waren die überwiegende Tätigkeit der Klimatologen bis in die 60er Jahre. Die Klimatologie war eine deskriptive Wissenschaft im Grenzgebiet von Meteorologie und Geographie mit dem Geruch von Inattraktivität und Langeweile². Die meteorologischen Lehrbücher

1. In diesen Jahren wurden aber mit Forschungssatelliten bedeutende Fortschritte bei der Messung einer großen Zahl atmosphärischer Spurenstoffe erzielt.
2. Callendar behandelte nur die infrarote Strahlungsbilanz und ließ die kurzwellige Strahlungsbilanz unberücksichtigt.

jener Zeit vermittelten den Eindruck, dass sowohl die Zusammensetzung der Atmosphäre im globalen Maßstab als auch das Klima, konventionell aus Mangel an genügend langen Messreihen definiert als 30-jährige Mittel, konstant seien.

Beide Annahmen wurden bald korrigiert. Klimaanomalien mit verheerenden Folgen wie die langjährige Trockenperiode in der Sahelzone, beginnend 1968 und bis weit in die 80er Jahre reichend, erinnerten an frühere Klimaanomalien.

Die Arbeiten des schwedischen Chemikers Svante Arrhenius (1896, 1903, 1908) mit der ersten quantitativen Abschätzung der Abhängigkeit der Oberflächentemperatur der Erde vom atmosphärischen CO_2 -Gehalt in geologischen Zeiträumen (1896) und zukünftiger Temperaturzunahme als Folge der wachsenden industriellen Produktion (1903, 1908), von ihm allerdings erst in einigen Jahrhunderten erwartet, waren zwar bekannt, fielen offenbar aber bald in Vergessenheit (Mudge 1997), weil führende Strahlungsexperten nur einen marginalen Effekt wegen der Überlappung der CO_2 -Absorptionsbanden mit den viel stärkeren von Wasserdampf erwarteten (K.Ångström 1900, 1901, Abbot und Fowle 1908). Nochmals hatte Callendar (1938), kein Spezialist auf diesem Gebiet, den anthropogenen Treibhauseffekt quantitativ diskutiert, der Beginn des zweiten Weltkriegs und beginnende Abnahme der Oberflächentemperatur der Nordhemisphäre Anfang der 40er Jahre verhinderten aber eine allgemeine Akzeptanz. Erst durch Plass (1956) wurde die Debatte einer möglichen Klimaänderung durch anthropogenen CO_2 -Anstieg wiederbelebt. Die Erforschung anthropogener Klimaänderungen erwies sich wie die Erforschung der allgemeinen atmosphärischen Zirkulation wie ein chaotischer Prozess (Lorenz 1991).

Die seit 1958 am Observatorium Mauna Loa, Hawaii, und am Südpol durch Keeling u.a. (1976a, 1976b) begonnenen quasikontinuierlichen Messungen von CO_2 und später von weiteren Spurengasen, auch an anderen zivilisationsfernen Stationen, zeigten neben dessen jährlicher Zuwachsrate von 1,4 bis 1,5 ppm auch die merkliche Zunahme weiterer atmosphärischer Treibhausgase (Abb. 13).

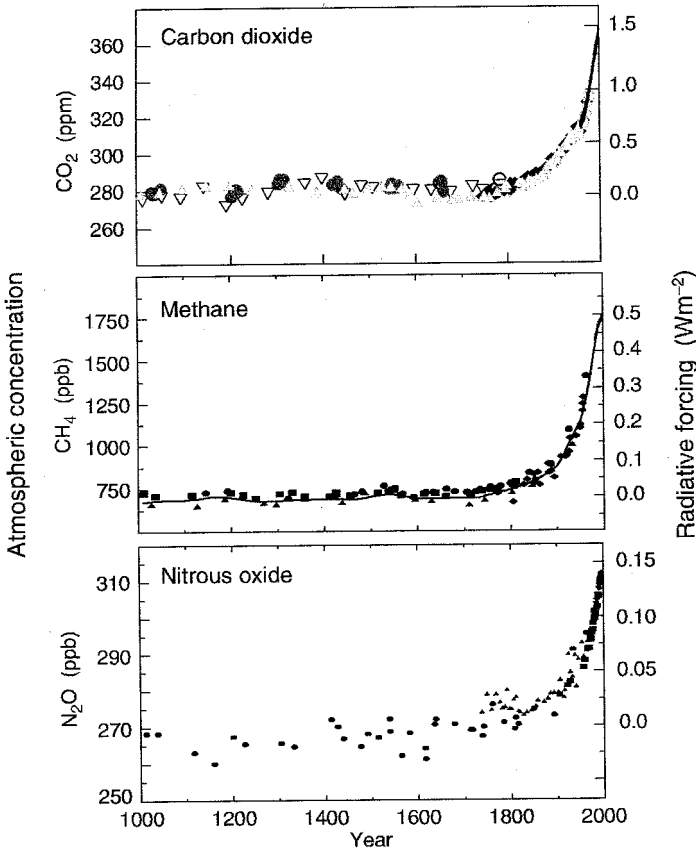


Abb. 13:

Konzentrationszunahme wichtiger atmosphärischer Treibhausgase in den letzten 1000 Jahren (nach IPCC 2001).

Ihr Gesamtanteil einschließlich der FCKW wurde bereits kurz nach Molina's und Rowland's Arbeit über die Bedrohung der stratosphärischen Ozonschicht durch die FCKW von Ramanathan (1975) und Wang et al. (1976) von etwa der gleichen Größe wie CO₂ angegeben. Um 1990 betrug der Anteil der FCKW am jährlichen Anstieg bereits etwa ¼ des Treibhauseffekts (Hansen et al. 1989). Abb. 14 zeigt die neuesten Daten wesentlicher Faktoren des Treibhauseffekts (nach IPCC 2001). Die Annahme einer Konstanz der chemischen Zusammensetzung im Spurenstoffbereich und damit wesentlicher

Eigenschaften der Atmosphäre war damit auch in kurzen Zeiträumen von Dekaden nicht gegeben.

**The global mean radiative forcing of the climate system
for the year 2000, relative to 1750**

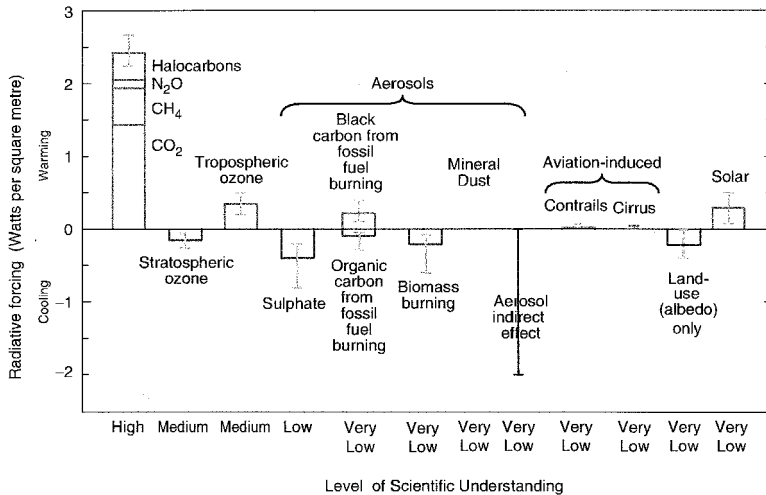


Abb. 14:

Änderung der Strahlungsbilanz der Atmosphäre (Zunahme des Treibhauseffekts) für das Jahr 2000 im Vergleich zu 1750. (nach IPCC 2001). Der Einfluss des hydrologischen Zyklus ist groß, aber selbst die Tendenz gegenwärtig nicht angebar¹.

In Vorbereitung auf GARP wurde mit dem Konzept des Klimasystems (Abb. 15) mit seinen Teilkomponenten Atmosphäre, Hydrosphäre, Biosphäre, Lithosphäre und Kryosphäre, charakterisiert durch sehr unterschiedliche Zeitkonstanten ihrer Wechselwirkung über mehr als zehn Größenordnungen, wie in der Einleitung schon erwähnt, ein neuer, erweiterter, interdisziplinärer Klimabegriff geschaffen. In den 60er Jahren war bereits, begünstigt durch verstärkte Beobachtungstätigkeit seit dem IGY 1957/58, die enge Kopplung ozeanologischer und atmosphärischer Phänomene im pazifischen Raum aufgefallen, der El Niño/Southern Oscillation-Zyklus (ENSO). Beide Phänomene waren schon jahrzehntlang bekannt. Die peruanischen Fischer kannten

1. Die hohe Korrelation zwischen Zunahme der Treibhausgase und Temperaturzunahme (IPCC 2001) lässt den Schluss zu, dass zumindest in der Vergangenheit Änderungen des hydrologischen Zyklus sich nicht wesentlich auf das Temperaturfeld ausgewirkt haben.

das jährliche Auftreten warmen Wassers um die Weihnachtszeit seit dem 19. Jahrhundert und nannten es deshalb El Niño. Später wurde dieser Begriff nur auf die alle zwei bis sieben Jahre auftretenden besonders intensiven Erwärmungen angewandt. Bis zum IGY und den darauffolgenden zwei El Niño-Ereignissen 1963 und 1965 hielt man El Niño für ein regionales Phänomen. Erst die neuen Beobachtungen zeigten, dass weite Teile des äquatorialen Pazifik davon erfasst sind.

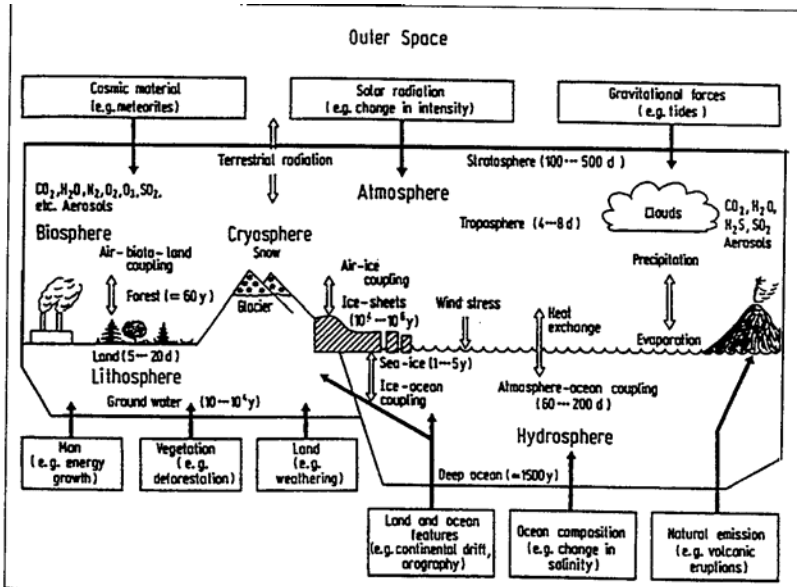


Abb. 15: Komponenten des Klimasystems in ihrer Wechselwirkung (nach Gates 1979, Hantel 1989)

Mit Southern Oscillation, untersucht ausführlich von Gilbert Walker in einer Reihe von Arbeiten in den 20er Jahren (Walker 1923, 1924), wird eine gleichzeitige Luftdruckanomalie vom langjährigen Mittel entgegengesetzten Vorzeichens über den tropischen Indischen Ozean einerseits und dem größten Teil des tropischen Pazifik bezeichnet (Abb. 16). Die Erkenntnis der Kopplung beider Phänomene geht auf Jacob Bjerknes (1969), Sohn von Vilhelm Bjerknes, zurück, der die Kausalbeziehung Erwärmung des Meerwassers vor den Küsten Perus → schwächerer Luftdruckgradient zwischen Indischen und Pazifischen Ozean und damit schwächerer Passatwinde erkannte (Abb. 17, nach Abb. 18). J. Bjerknes wies auch auf den Zusammenhang zwischen den

Anomalien der Meeresoberflächentemperatur des Pazifik und den zeitlich verzögert einsetzenden Anomalien der nordhemisphärischen Westwinde im Winterhalbjahr hin und lenkte damit die Aufmerksamkeit auf Fernwirkungen in der Atmosphäre. Heute sind zahlreiche regionale Anomalien weltweit mit teilweise erheblichen negativen wirtschaftlichen Auswirkungen von El Niño dokumentiert (Abb. 18).

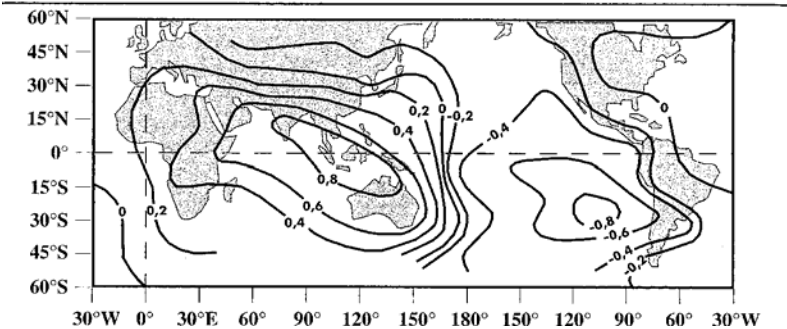


Abb. 16: Luftdruckkorrelation der Southern Oscillation. Negative Abweichungen über dem Ostpazifik treten bei El Niño auf.

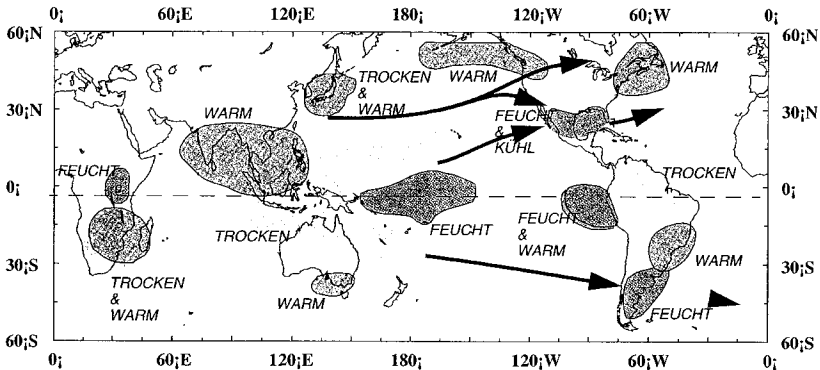


Abb. 18: Regionale Klima-anomalien bei El Niño im Nordwinter. Muster für Nordsommer und La Niña siehe Lozán u.a. (2001)

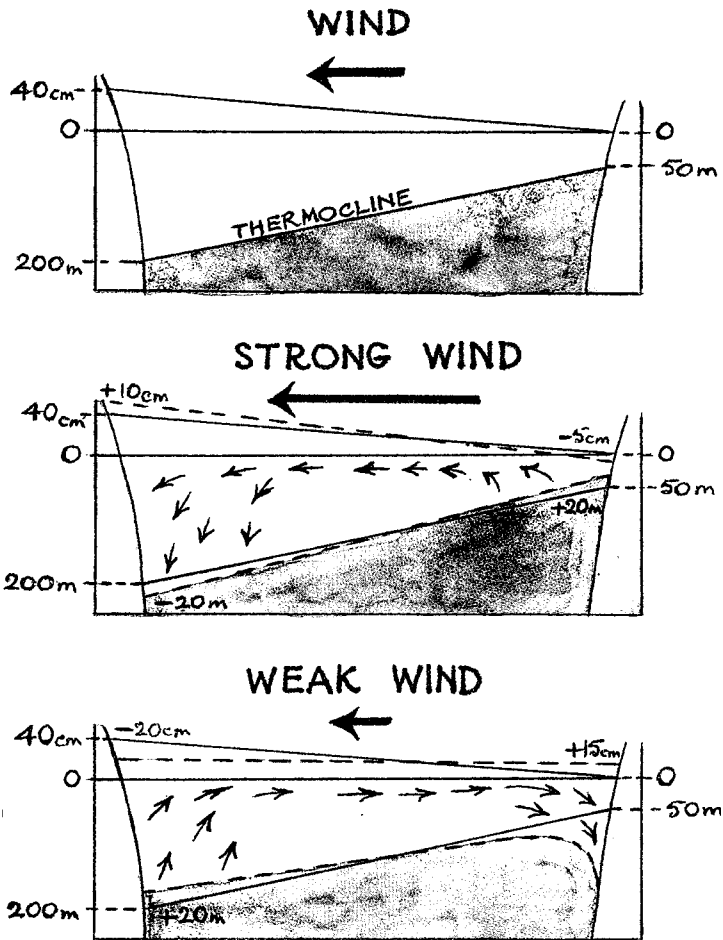


Abb. 17:

Reaktion der thermischen Struktur des äquatorialen Pazifik auf die Stärke des Passats, oben: normale Bedingungen mit Meeresspiegelanstieg und Thermohalinenabfall westwärts, Mitte: Bedingungen bei El Niña, unten: Bedingungen bei El Niño (Wyrki 1982)

Für Europa sind Auswirkungen von El Niño nur marginal bzw. nicht nachweisbar. Hier ist die Nordatlantische Oszillation (NAO), charakterisiert durch Antikorrelation des Luftdrucks zwischen Island und den mittleren Breiten des

Nordatlantik, die ebenfalls bereits von Walker in den 20er und 30er Jahren gefunden wurde, für Witterungs- und Klimaanomalien maßgebend (Rogers 1984). NAO ist im Gegensatz zu ENSO wie andere atmosphärische Fernwirkungen, die in den letzten 50 Jahren gefunden wurden und auf die hier nicht weiter eingegangen werden kann, im Wesentlichen das Ergebnis interner atmosphärischer Dynamik.

Die Befunde über die Zunahme der Treibhausgase initiierten Arbeiten zur Klimamodellierung mit dem Ziel einer Klimavorhersage. Konzeptionell war dabei die Unterscheidung von Lorenz (1968,1975) in Klimavorhersagbarkeit erster Art und Klimavorhersagbarkeit zweiter Art von großem Nutzen. Die Vorhersage erster Art hängt sowohl von den Anfangsbedingungen als auch den Randbedingungen ab. Die zeitliche Entwicklung ist dabei im Detail nicht vorhersagbar, aber angenähert nach Herausfiltern des nichtdeterministischen Rauschens. Die Vorhersagbarkeit zweiter Art, die zeitliche Entwicklung bis zu einem statistischen Gleichgewicht, ist unabhängig von den Anfangsbedingungen und wesentlich durch die Randbedingungen bestimmt. Dabei kann das System transitiv oder intransitiv sein, je nachdem, ob alle Anfangszustände zu demselben Satz statistischer Eigenschaften, d.h. einer eindeutigen Lösung, führen oder nicht. Alle nichtlinearen Systeme, selbst wesentlich einfachere als das Klimasystem, sind fast intransitiv. Das statistische Ensemble, resultierend aus der Mittelung über ein sehr langes, aber endliches Intervall, ist sehr wohl von den Anfangsbedingungen abhängig.

Die moderne Entwicklung von Klimamodellen (Abb. 19) setzte in den 60er Jahren nahezu gleichzeitig mit verschiedenen Modellansätzen ein. Dreidimensionale Modelle der allgemeinen atmosphärischen Zirkulation begannen mit den Rechnungen von Phillips (1956) und Smagorinsky (1963). Daneben wurden eindimensionale Energiebilanzmodelle (z.B. Budyko 1969, Sellers 1969) zur Berechnung der zonalen Mitteltemperatur an der Erdoberfläche in Abhängigkeit von der geographischen Breite, eindimensionale Strahlungskonvektionsmodelle (Manabe und Strickler 1964) zur Berechnung der vertikalen Temperaturschichtung an einem Punkt und zweidimensionale zonal gemittelte statistisch-dynamische Modelle mit Vertikalerstreckung bei expliziter Behandlung der Oberflächen- und dynamischen Prozesse entwickelt, um die zahlreichen, dem System immanenten Rückkopplungsmechanismen (Abb. 20) in ihrer Wirkung detailliert zu untersuchen. Seit den 80er Jahren wurden gekoppelte Ozean-Atmosphärenmodelle von wachsender Komplexität entwickelt (z.B. Manabe et al. 1991). Besonders bedeutungsvoll war die Entdeckung der anthropogenen Beeinflussung der ozeanischen Zir-

kulation (Cubasch et al. 1993, Manabe und Stouffer 1993). Sollte die thermohaline Zirkulation die Achillessehne unseres Klimasystems sein? (Broecker 1997). Entsprechende Modelluntersuchungen lassen sowohl eine Schwächung als auch eine Verstärkung des Golfstroms zu (Rahmstorf 1995, Schiller et al. 1996). Insbesondere die Reaktion des hydrologischen Kreislaufs auf Klimavariationen ist ein wesentlicher Faktor der bestehenden Unsicherheit (Rahmstorf und Ganopolski 1999). Der Wasserkreislauf ist für Atmosphäre (Abb. 14) und Hydrosphäre die große Unbekannte.

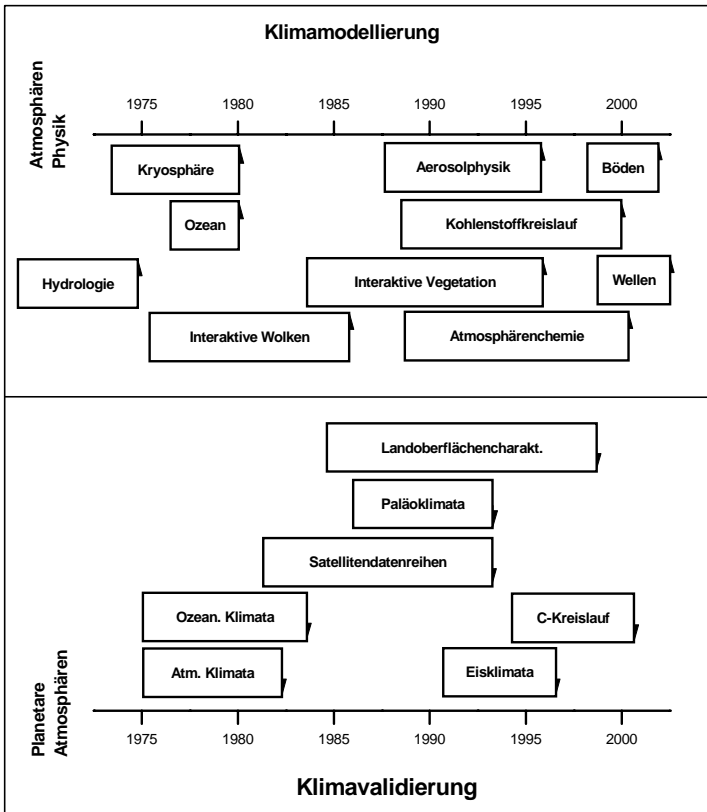


Abb. 19: Fortschritte der Klimamodellierung und Klimavalidierung in den letzten 25 Jahren (Nach J.C.R. Hunt, zitiert nach ECSN 1995)

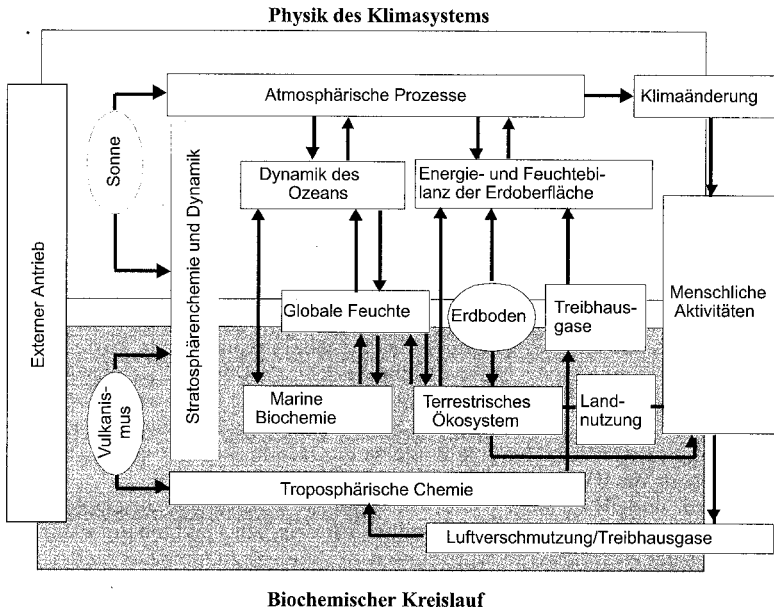


Abb. 20:

Das Klima der Erde als mehrfach rückgekoppeltes System physikalischer und biochemischer Prozesse

Ebenfalls in den letzten zehn Jahren wurden globale Zirkulationsmodelle mit Prozessen der Biosphäre gekoppelt, zunächst mit interaktiver Vegetation im Zeitscale bis zu jahreszeitlichem Wechsel (z.B. Bounoua et al. 2000), neuerdings aber auch mit dem Kohlenstoffkreislauf selbst (Cox et al. 2000, Friedlingstein et al. 2001). Die Berücksichtigung des Kohlenstoffkreislaufs führt wegen der Beeinträchtigung der terrestrischen Kohlenstoffsенke zu einem verstärkten Anstieg des atmosphärischen CO_2 . Die Größenordnung dieses Anstiegs als Folge der positiven Rückkopplung der Biosphäre ist noch recht unsicher – er reicht von 75 ppmv bis 250 ppmv bis zum Jahr 2100 - und von Faktoren abhängig, die noch nicht gut bekannt sind wie die Temperaturempfindlichkeit der Bodenatmung und der Anteil des Bodenkohlenstoffs, der durch Bodenorganismen zersetzbar ist.

Klimamodellierung schließt als notwendigen Schritt Modellvalidierung mit ein (Abb. 19), um die Klimamodelle auch als solides Prognosemittel verwenden zu können. Klimamodelle müssen das gegenwärtige Klima mit seiner

Variabilität bis zu Dekaden (El Niño, NAO, Monsune, u.a.), die Klimaänderung seit etwa Mitte des 19. Jahrhunderts (z.B. globaler Temperaturanstieg, erhöhte Niederschläge in hohen Breiten) und Klimavariationen der Vergangenheit (kleine Eiszeit, Einfluss starker Vulkaneruptionen) sowie als Härteste abrupte regionale Klimaänderungen (z.B. Entstehung der hyperariden Sahara, Dansgaard-Oeschger-Ereignisse) (Broecker 1987) in genügender Qualität reproduzieren.

W. Böhme (1998) hat in seinem Vortrag an dieser Stelle zum Problem Modelle/Realität bemerkt: „Alle Modelle enthalten Vereinfachungen und Vernachlässigungen (auch viele recht wirksame physikalische und chemische Vorgänge können bisher nur sehr vereinfacht beschrieben und/oder in den Modellen berücksichtigt werden). – Jedes Modell hat seinen eigenen Attraktor. Man kann durch *numerische* Experimente zwar die Eigenschaften der Modelle erkunden; dies sind aber Aussagen, die wegen der blättrigen, fraktalen Struktur der Attraktoren nur mit großer Vorsicht auf die Wirklichkeit und ihren Attraktor übertragen werden können. Das Problem ist es, die richtige Lösungsfläche zu treffen.“

7. Schlussbetrachtung

Die Meteorologie hat in den letzten 50 Jahren bedeutende Fortschritte zu verzeichnen. Ihre öffentliche Akzeptanz wuchs beträchtlich. Zeichen dieser gestiegenen Wertschätzung ist die erstmalige Verleihung des Nobelpreises 1995 für Chemie an die Atmosphärenwissenschaftler Rowland, Molina und Crutzen 3-89626-388-9.

Gleichzeitig mit den Fortschritten wuchsen aber auch die gesellschaftlichen Anforderungen an sie. Zum einen ist es die stärkere Anfälligkeit der menschlichen Gesellschaft auf Naturereignisse, zum anderen sind es die bisher in diesem Ausmaß noch nie dagewesenen Eingriffe in alle natürlichen Systeme mit noch nicht vorhersagbaren Konsequenzen, die weitere Anstrengungen erfordern. Diese Anstrengungen haben auf allen Ebenen zu erfolgen. Klimamodelle für globale Umweltpolitik erfordern höhere räumliche Auflösung und damit Regionalisierung, und höhere Spezialisierung. Ein verbesserter Küstenschutz benötigt z.B. ein anderes Modell als die Vorhersage des weiteren Verlaufs des Ozonlochs. Der Gleichschritt von Modellierung und Monitoring, Gewähr für wissenschaftlichen Fortschritt, ist aber in Gefahr. Die im Glauben an die Möglichkeiten der Satelliten, die sich in dieser Form nicht verwirklichten, einsetzende Verdünnung des in situ Messnetzes schreitet weiter fort. Auch hier wieder W. Böhme (1998): „Die überall in der Welt

zunehmende Tendenz, im Sinne einer falsch verstandenen Sparsamkeit die langen Reihen abzubrechen oder die Stationen zu ändern, ist dem besseren Verständnis der allgemeinen Zirkulation und des Klimasystems in hohen Grade abträglich“.¹

Was wäre, wenn das Ozonloch nicht buchstäblich 5 vor 12 entdeckt worden wäre?

Literatur

- Abbot, C.G. und F.E. Fowle (1908): Apparatus for „solar-constant“ determinations, *Ann. Astrophys. Obs. Smithsonian Inst.* 2, 21-49
- AMBIO (1982): Nuclear War: The aftermath, AMBIO 11, Heft 2/3
- Andreae, M.O. und P.J. Crutzen (1997): Atmospheric aerosols: Biogeochemical sources and role in atmospheric chemistry, *Science* 276, 1052-1058
- Ångström, K. (1900) : Über die Bedeutung des Wasserdampfes und der Kohlensäure bei der Absorption der Erdatmosphäre, *Ann. Phys.* 4, 720-733
- Ångström, K. (1901) : Über die Abhängigkeit der Absorption der Gase , besonders der Kohlensäure, von der Dichte, *Ann. Phys.* 5, 163-173
- Arago, F. (1845): Le prédiction du temps, in M. J.-A. Barral (Hrsg.) : *Ceuvres de François Arago*, vol. 8, *Notices Scientifiques* vol. 5, 1-24, Paris 1858
- Arrhenius, S. (1896): On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground, *Philos. Mag. (Ser. 5)*, 41, 237-276
- Arrhenius, S. (1903): *Lehrbuch der kosmischen Physik*, Bd. 2, S. Hirzel Leipzig
- Arrhenius, S. (1908): *Worlds in the Making*, Harper New York
- Balzer, K., W. Enke und W. Wehry (1998): *Wettervorhersage*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- Bates , D.R. und P.B. Hayes (1967): Atmospheric nitric oxide, *Planet. Space Sci.* 15, 189-197
- Bengtsson, L. (1999): From short-range barotropic modelling to extended-range global weather prediction: a 40-year perspective, *Tellus* 51 AB, 13-32
- Bergeron, T. (1959): *Methods in scientific weather analysis and forecasting. An outline in the history of ideas and hints at a program*, The ROSSBY Memorial Volume, The Rockefeller Institute Press, New York, 440-474

1. In Deutschland wurden allein in den letzten zehn Jahren drei Observatorien des Deutschen Wetterdienstes, darunter zwei mit langjährigen Mess- und Beobachtungsreihen, und zwar das Meteorologische Observatorium Dresden-Wahnsdorf, gegründet 1916, und das meteorologische Observatorium Potsdam, gegründet 1893, geschlossen. Zu letzterem siehe Spänkuch: Die Rolle der meteorologischen Observatorien im Wandel der Zeit am Beispiel des Meteorologischen Observatoriums Potsdam, *Mitteilungen der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft (DMG)*, H. 4 (2000), 6-8.

- Bernhardt, K. (1987): Aufgaben der Klimadiagnostik in der Klimaforschung, *Gerlands Beitr. Geophys.* 96, 113-126
- Bjerknes, V. (1904): Das Problem der Wettervorhersage, betrachtet vom Standpunkt der Mechanik und Physik, *Meteorol. Zeitschrift* 21, 1-7
- Bjerknes, J. (1969): Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific, *Mon. Wea. Rev.* 97, 162-172
- Böhme, W. (1969): Über den etwa 2jährigen Zyklus der allgemeinen Zirkulation und seine Ursachen, *Geodätische und Geophysikalische Veröffentlichungen, Reihe II, Heft 9*, 160 S.
- Böhme, W. (1998): Atmosphärische Zirkulation und Chaos, *Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät* 24, Heft 5, 151-182
- Böhme, W. und H.-G. Körber (1984): Zur Mitarbeit von Wissenschaftlern der DDR an internationalen geophysikalischen Forschungsthemen auf dem Gebiet der Meteorologie. Ein Beitrag anlässlich der Jubiläen geophysikalischer Forschungsvorhaben 1982/83, *Abhandlungen des Meteorologischen Dienstes der DDR, Band XVIII, Nr. 133*, 7-12
- Bojkov, R.D. (1995): The changing ozone layer, *WMO/UNEP*
- Bounoua, L., G. J. Collatz, S. O. Los, P. J. Sellers, D. A. Dazlich, C. J. Tucker und D. A. Randall (2000): Sensitivity of climate to changes in NDVI, *J. Clim.* 13, 2277-2292
- Brockhaus (1997): Die Enzyklopädie in 24 Bänden, 20. Aufl., F.A.Brockhaus Leipzig, Mannheim
- Broecker, W. C. (1987): Unpleasant surprises in the greenhouse? *Nature* 328, 123-126
- Broecker, W. C. (1997): Thermohaline circulation, the Achilles heal of our climate system: Will man-made CO₂ upset the current balance?, *Science* 278, 1582-1588
- Bruce, J.P. (1990): The atmosphere of the living planet Earth, *WMO-No.735*, 42S.
- Brune, W. (2000): OH and HO₂: Sources, interactions with nitrogen oxides, and ozone production, *Global Change Newsletter* 43, Oct. 2000, 15-19
- Budyko, M. I. (1969): The effect of solar radiation variations on the climate of the earth, *Tellus* 21, 611-619
- Callendar, G.S. (1938): The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature, *Quart. J. Royal Meteorol. Soc.* 64, 223-237
- Carl, P. (1990): Atmosphärische und klimatische Folgen eines Atomkrieges, In *Svirozhev u.a. (1990)*, 160-213
- Chameides, W.L. und J.C.G. Walker (1973): A photochemical theory of tropospheric ozone, *J. Geophys. Res.* 78, 8751-8760
- Charney, J.G. (1948): On the scale of atmospheric motions, *Geofysiske Publikasjoner* 17(2), 1-17
- Charney, J.G., R. Fjørtoft und J. von Neumann (1950): Numerical integration of the barotropic vorticity equation, *Tellus* 2, 237-254

- Chubachi, S. (1984): A special ozone observation at Syowa Station, Antarctica from February 1982 to January 1983, In: Zerefos, C.S. and A. Ghazi, Eds.: Atmospheric ozone, D. Reidel, Dordrecht, 285-289
- Clifford, S.F., J.C. Kaimal, R.J. Latatits und R.G. Strauch (1994): Ground-based remote profiling in atmospheric studies: An overview, Proc. IEEE 82, 313-355
- Cox, P. M., R. A. Betts, S. A. Spall und I. J. Totterdell (2000): Acceleration of global warming due to carbon cycle feedbacks in a coupled climate model, Nature 408, 184-197
- COSPAR (1978): Toward an internationally coordinated earth radiation budget satellite observing system: scientific uses and system considerations. Report of results of specialists meeting on satellite observing systems for radiation budget studies, Alpbach, Austria, May 1978
- Crutzen, P.J. (1969): Determination of parameters appearing in the "dry" and "wet" photochemical theories for ozone in the stratosphere, Tellus 21, 368-388
- Crutzen, J.P. (1970): The influence of nitrogen oxides on the atmospheric ozone content, Quart. J. Royal Meteorol. Soc. 96, 320-325
- Crutzen, P. (1974a): Photochemical reactions initiated by an influencing ozone in unpolluted tropospheric air, Tellus 26, 47-57
- Crutzen, P.J. (1974b): A review of upper atmospheric photochemistry, Can. J. Chem. 52, 1569-1581
- Crutzen, P.J. (1976): The possible importance of CSO for the sulfate layer of the stratosphere, Geophys. Res. Lett. 3, 73-76
- Crutzen, P.J. (1999): Global problems of atmospheric chemistry – The story of Man's impact on atmospheric ozone, In Möller, D. (Ed.): Atmospheric environmental research, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 3-30
- Crutzen, P. J. (2000): The ascent of atmospheric sciences, Science 290, 299-304
- Crutzen, P.J. und J.W. Birks (1982): The atmosphere after a nuclear war: Twilight at noon, Ambio 11, 114-125
- Cubasch, U. et al. (1993): Time-dependent greenhouse warming computations with a coupled ocean-atmosphere model, Clim. Dyn. 8, 55-69
- Eliassen, A. (1949): The quasi-static equations of motion with pressure as independent variable, Geofysiske Publikasjoner 17(3), 1-44
- Fabian, P. (1976): Atmospheric ozone and man-made pollution, Naturwissenschaften 63, 273-279
- Fabian, P. (1992): Atmosphäre und Umwelt, 4. Aufl., Springer-Verlag Berlin, u.a.
- Farman, J.C., B.G. Gardiner und J.D. Shanklin (1985): Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO/NO_x interaction, Nature 315, 207-210
- Feister, U. (1990): Ozon – Sonnenbrille der Erde, Teubner Verlagsgesellschaft Leipzig
- Ferguson, H.L. (1989): Greenhouse warming – Scientific aspects to an international agreement, International Meeting of legal and policy experts on protection of the atmosphere, Ottawa, Canada

- Finlayson-Pitts, B.J. und J.N. Pitts Jr. (1997): Tropospheric air pollution: Ozone, airborne toxics, polycyclic aromatic hydrocarbons, and particles, *Science* 276, 1045-1052
- Flemming, G. (1971): Studie zu den Einteilungsprinzipien der Meteorologie, Veröffentlichungen des Meteorologischen Dienstes der DDR, Nr.21
- Friedlingsstein, P., L. Bopp, P. Ciais, J-L. Dufrene, L. Fairhead, H. LeTreut, P. Monfray und J. Orr (2001): Positive feedback of the carbon cycle on future climate change, *Geophys. Res. Lett.*
- Gates, W. L. (1979): The physical basis of climate, in *Proceedings of the World Climate Conference*, WMO No. 537, World Meteorological organization, Geneva, Switzerland, 112-131
- Graßl, H. (1999): *Wetterwende. Vision: Globaler Klimaschutz*. Campus Verlag, Frankfurt/New York, 240S.
- Güldner, J. und D. Spänkuch (2001): Remote sensing of the thermodynamic state of the atmospheric boundary layer by ground-based microwave radiometry, *J. Atmos. Oceanic Technol.* 18, 925-933
- Hampson, J. (1966): Chemiluminescent emissions observed in the stratosphere and mesosphere, In Nicolet, M. (Ed.): *Les Problèmes Météorologiques de la Stratosphère et de la Mésosphère*, 393-440
- Hampson, J. (1974): Photochemical war in the atmosphere, *Nature* 250, 189-191
- Hansen, J., A. Lacis und M. Prather (1989): Greenhouse effect of chlorofluorocarbons and other trace gases, *J. Geophys. Res.* 94, 16417-16421
- Hantel, M. (1989): Climate modeling, in *Landolt-Börnstein: Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaft und Technik, Neue Serie, Gr. V, Bd. 4, Meteorologie, Teilbd. C2*, Springer-Verlag Berlin u.a., 1-116
- Hare, K. (1979): The vaulting of intellectual barriers: The Madison thrust in meteorology, *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 60, 1171-1174
- Harwell, M.A. (1984): *Nuclear Winter. The human and environmental consequences of nuclear war*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York-Tokyo
- Harwell, M.A. und T.C. Hutchinson (1985): *Environmental consequences of nuclear war, SCOPE 28, Vol. II: Ecological and agricultural effects*, Wiley, Chichester, New York
- Hunt, B.G. (1966): Photochemistry of ozone in a moist atmosphere. *J. Geophys. Res.* 71, 1385-1391
- ICSU/WMO (1969): *Cospar Working Group VI: Report to the JOC for the GARP: Systems possibilities for an early GARP Experiment*, GARP Publication Series No. 2, 55 S.
- ICSU/WMO (1973): *The First GARP Global Experiment*. GARP Publication Series No. 11, 107 S.
- IPCC (2001): *Climate Change 2001, the Scientific Basis*, Cambridge University Press

- Johnston, H. (1971): Reduction of stratospheric ozone by nitrogen dioxide catalysts from SST exhausts, *Science* 173, 517-522
- Johnston, H.S., G. Whitten und J. Birks (1973): Effect of nuclear war explosions on stratospheric nitric oxide and ozone, *J. Geophys. Res.* 78, 6107-6135
- Junge, C. (1952): Gesetzmäßigkeiten in der Größenverteilung atmosphärischer Aerosole über dem Kontinent, *Ber. Dtsch. Wetterdienst US-Zone* 35, 261-276
- Junge, C. (1963): Air chemistry and radioactivity. Academic Press New York
- Junge, C.E., Chagnon, C.W. und J.E. Manson (1961): Stratospheric aerosols. *J. Meteorol.* 18, 81-108
- Keeling, C.D. et al. (1976a): Atmospheric carbon dioxide variations at Mauna Loa Observatory, Hawaii, *Tellus* 28, 538-551
- Keeling, C. D., et al. (1976b): Atmospheric carbon dioxide variation at the South Pole, *Tellus* 28, 552-564
- Kley, D. (1997): Tropospheric chemistry and transport. *Science* 276, 1043-1045
- Kluge J. (1984): Dynamische Meteorologie – Operative Vorhersage, *Abh. Meteorol. Dienst DDR* 133, 17-25
- Kluge, J. (1986): Entwicklung der Analyse und Vorhersage mesometeorologischer Prozess als Weg zur Erhöhung der Leistungen der Meteorologie gegenüber der Volkswirtschaft, *Abh. Meteorol. Dienst DDR* 136, 19-24
- Kluge, J. (1989): Physikalische Beschreibung, mathematische Modellierung und Vorhersage mesometeorologischer Prozesse, *Abh. Meteorol. Dienst DDR* 141, 57-67
- Kondratyev, K.Ya. (1990): Internationales Weltraumjahr: Prioritäten und Perspektiven. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*, No.1, 3-13, (in Russisch)
- Kondratyev, K.Ya. und G.E. Hunt (1982): Weather and climate on planets, Pergamon Press, Oxford u.a.
- Labitzke, K. (1999): Die Stratosphäre. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 177 S.
- Levine, J.S., ed. (1985): The photochemistry of atmospheres. Earth, the other planets, and comets. Academic Press Inc., Orlando u.a.
- Levy II, H. (1971): Normal atmosphere: Large radical and formaldehyde concentrations predicted. *Science* 173, 141-143
- Levy II, H. (1972): Photochemistry of the lower troposphere. *Planet. Space Sci.* 20, 919-935
- Lorenz, E.N. (1963): Deterministic nonperiodic flow, *J. Atmos. Sci.* 20, 130-141
- Lorenz, E. N. (1968): Climatic determinism, *Meteorol. Monographs* 8, No. 30, 1-3
- Lorenz, E. N. (1969): The predictability of a flow which possesses many scales of motion, *Tellus* 21, 289-307
- Lorenz, E. N. (1975): Climate predictability: The physical basis of climate and climate modelling, *GARP Publ. Ser. No.* 16, 132-136
- Lorenz, E.N. (1985): Prospects for improved weather forecasting, *GARP Special Report No.* 43, *WMO/TD No.* 33, III-1 – III-11

- Lorenz, E.N. (1991): The general circulation of the atmosphere: an evolving problem, *Tellus* 43 AB, 8-15
- Lovelock, J.E. (1971): Atmospheric fluorine compounds as indicators of air movements, *Nature* 230, p. 379
- Lovelock, J.E., R.J. Maggs und R.J. Wade (1973): Halogenated hydrocarbons in and over the Atlantic, *Nature* 241, 194-196
- Lozán, J. L., H. Graßl und P. Hupfer (2001): Climate of the 21st century: Changes and risks, *Wissenschaftliche Auswertungen Hamburg*
- Manabe, S. und R. F. Strickler (1964): Thermal equilibrium of the atmosphere with a convective adjustment, *J. Atmos. Sci.* 21, 361-385
- Manabe, S., R. J. Stouffer, M. J. Spelman und K. Bryan (1991): Transient responses of a coupled ocean-atmosphere model to gradual changes of atmospheric CO₂. Part I: Annual mean response, *J. Clim.* 5, 105-126
- Manabe, S. und R. J. Stouffer (1993): Century-scale effects of increased CO₂ on the ocean-atmosphere system, *Nature* 364, 215-218
- Marchuk, G.I. (1976): Physik der Atmosphäre und des Ozeans und das Problem der Wettervorhersage, *Meteorol. i Gidrol. No.* 10, 3-14
- Möller, D. (1998): Atmosphärische Chemie – ein Instrument der Luftreinhaltung oder eine Disziplin der angewandten Chemie? *Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät* 24,H.5, 31-39
- Molina L.T. und F.S. Rowland (1974): Stratospheric sink of chlorofluoromethans: Chlorine atome-catalyzed destruction of ozone, *Nature* 249, 810-812
- Mount, G.H. und E.J. Williams (1997): An overview of the Tropospheric OH Photochemistry Experiment, Fritz Peak/Idaho Hill, Colorado, fall 1993. *J. Geophys. Res.* 102, D5, 6171-6186
- Mudge, F.B. (1997): The development of the 'greenhouse' theory of global climate change from Victorian times, *Weather* 52, 13-17
- Odén, S. (1976): The acidity problem – an outline of concepts, *Water, Air and Soil Pollution* 6, 137-166
- Orlanski, I. (1975): A rational subdivision of scales for atmospheric processes, *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 56, 527-530
- Paetzoldt, H.-K. (1961): Messungen des atmosphärischen Ozons. In Hesse, W. (Hrsg.): *Handbuch der Aerologie*, Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig, Leipzig, 458-531
- Phillips, N. A. (1956): The general circulation of the atmosphere: A numerical experiment, *Quart. J. Royal Meteorol. Soc.* 82, 123-164
- Phillips, N., W. Blumen und O. Coté (1960): Numerical weather prediction in the Soviet Union, *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 41, 599- 617
- Pitcock, A.B., u.a. (1986): Environmental consequences of nuclear war, *SCOPE* 28, Vol. I: Physical and atmospheric effects, Wiley, Chichester, New York
- Plass, G. (1956): The influence of the 15 μ carbon-dioxide band on the atmospheric infra-red cooling rate, *Quart. J. Royal Meteorol. Soc.* 82, 140-154

- Platzman, G.W. (1979): The ENIAC computations of 1950 – Gateway to numerical weather prediction, *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 60, 302-312
- Prinn, R. (1971): Photochemistry of HCl and other minor species in the atmosphere of Venus, *J. Atmos. Sci.* 28, 1058-1068
- Prinn, R. (1973): Venus: Composition, and structure of the visible clouds, *Science* 182, 1132-1135
- Prinn, R.G. und B. Fegley, Jr. (1987): The atmospheres of Venus, Earth, and Mars: a critical comparison, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 15, 171-212
- Rahmstorf, S. (1995): Bifurcations of the Atlantic thermohaline circulation in response to changes in the hydrological cycle, *Nature* 378, 145-149
- Rahmstorf, S. und A. Ganopolski (1999): Long-term global warming scenarios computed with an efficient coupled climate model, *Clim. Change*
- Ramanathan, V. (1975): Greenhouse effect due to chlorofluorocarbons: Climatic implications, *Science* 190, 50-52
- Ravishankara, A.R. (1997): Heterogeneous and multiphase chemistry in the troposphere. *Science* 276, 1058-1065
- Richardson, L.F. (1922): *Weather prediction by numerical process*, Cambridge University Press; Nachdruck 1965 Dover Publications
- Roan, S.L. (1989): *Ozone crisis: The 15-year evolution of a sudden global emergency*. Wiley New York
- Rogers, J. C. (1984): The association between the North Atlantic Oscillation and the Southern Oscillation in the northern hemisphere, *Mon. Wea. Rev.* 112, 1999-2015
- SCEP (1970): *Study of Critical Environmental Problems, Man's Impact on the Global Environment*, The M.I.T. Press
- SMIC (1971): *Study of Man's Impact on Climate, Inadvertent Climate Modification*, The M.I.T. Press, 308 S.
- Schiller, A. et al. (1996): The stability of the thermohaline circulation in a coupled ocean-atmosphere general circulation model, *Clim. Dyn.* 13, 325-347
- Schramm, E. (1986): *Der Aufstieg der chemischen Industrie. Bild der Wissenschaft* 8, 86-90
- Sellers, W. D. (1969): A global climate model based on the energy balance of the earth-atmosphere system, *J. Appl. Meteorol.* 8, 392-
- Slinn, W. G. N. (1983): Sources and surface-area distributions of atmospheric particles, *Atmos. Environ.* 17, 2363-2364
- Smagorinsky, J. (1963): General circulation experiments with the primitive equations, *Mon. Wea. Rev.* 93, 99-164
- Smagorinsky, J. (1983): The beginnings of numerical weather prediction and general circulation modelling: Early recollections, *Adv. Geophys.* 25, 3-37
- Spänkuch, D. (1991): *Der Strahlungshaushalt der terrestrischen Planeten Venus, Erde und Mars. Naturwissenschaften* 78, 347-345
- Spänkuch, D. (1994): Erkennung atmosphärischer Strukturen und Prozesse aus Satellitendaten, *Ann. Meteorol.* 29, 51-92

- Spänkuch, D. (1995): Die Strahlungseigenschaften der Erdatmosphäre. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät 7, 121-139
- Stolarski, R.S. und R.J. Cicerone (1974): Stratospheric chlorine. A possible sink for ozone, *Can. J. Chem.* 52, 1610-1615
- Spivetzhev, J.M., u.a. (1990): Götterdämmerung. Globale Folgen eines atomaren Konflikts, Akademie-Verlag Berlin
- Taubenheim, J. (1991): Die Erdatmosphäre – ein anomaler Fall unter den Planetenatmosphären. *Nova Acta Leopoldina NF* 65, Nr. 277, 165-176
- Turco, R.P., Toon, Ackerman, Pollack und Sagan (1983): Nuclear winter: Global consequences of multiple nuclear explosions, *Science* 222, 1283-1292
- Walker, G. T. (1923): Correlation in seasonal variation of weather, VIII: A preliminary study of world weather (World Weather I), *Memoirs of the Royal Meteorol. Soc.* 24, 75-31
- Walker, G. T. (1924): Correlations in seasonal variations of weather, IX: A further study of world weather (World Weather II), *Memoirs of the Royal Meteorol. Soc.* 24, 275-332
- Wang, W. C., Y. L. Yung, A. A. Lacis, T. Mo und J. E. Hansen, (1976): Greenhouse effects due to man-made perturbations of trace gases, *Science* 194, 685-690
- Whitby, K. T. (1978): The physical characteristics of sulfur aerosols, *Atmos. Environ.* 12, 135-159
- Wiin-Nielsen, A. (1991): The birth of numerical weather prediction, *Tellus* 43AB, 36-52
- Wiin-Nielsen, A. (2001): Numerical weather prediction: The early development with emphasis on Europe, In: Spekta, A. (Hrsg.): 50th Anniversary of Numerical Weather Prediction, Commemorative Symposium Potsdam, 9-10 March 2000, Book of Lectures, DMG e.V., Berlin, S.29-39
- Wilczak, J.M., E.E. Gossard, W.D. Neff und W.L. Eberhard (1996): Ground-based remote sensing of the atmospheric boundary layer: 25 years of progress, *Bound. Layer Meteorol.* 78, 321-349
- WMO (1989): The Bulletin Interviews. Professor F. Kenneth Hare. *WMO Bulletin* 38, 3-16
- WMO (1994): Scientific Assessment of ozone depletion: 1994
- WMO (1998a): The Bulletin Interviews. Prof. Dr. Wolfgang Böhme. *WMO Bulletin* 47, 223-232
- WMO (1998b): The Bulletin Interviews: Professor Paul Josef Crutzen. *WMO Bulletin* 47, 111-123
- WMO (2001): WMO statement on the status of the global climate in 2000, *WMO-No.* 920
- Wofsy S.C. und M.B. McElroy (1974): HO_x, NO_x and ClO_x: Their role in atmospheric photochemistry, *Can. J. Chem.* 52, 1582-
- Wyrtki, K. (1982): The Southern Oscillation, ocean-atmosphere interaction and El-Niño, *Marine Techn. Soc. J.* 16, 3-10