SITZUNGSBERICHTE
DER LEIBNIZ-SOZIETÄT
Band 52 • Jahrgang 2002

trafo Verlag Berlin

ISSN 0947-5850 ISBN 3-89626-388-9

Inhalt

Beiträge zur Festsitzung der Klasse Naturwissenschaften zu Ehren des 75. Geburtstages von Wolfgang Böhme

01 Zum Geleit

02 Dietrich Spänkuch: Zur Entwicklung der Meteorologie in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts

03 Thilo Günther: Die Rolle der Hydrometeorologie für Hochwasservorhersage und Bewirtschaftung der Wasserressourcen

04 Herbert Teichmann: Friedrich Wöhler als Berliner Lehrer und Forscher

05 Heinz Kautzleben: Geschichte und Philosophie der Geophysik

Rezensionen

06 Heinz Kautzleben: Wilfried Schröder (Hrsg.), Beiträge zur Geschichte der Geophysik und Kosmischen Physik

07 Herbert Hörz: Chronopsychobiologie und Stress. Karl Hecht, Ovidiu König, Hans Peter Scherf (Hrsg.), Emotioneller Stress durch Überforderung und Unterforderung

Zum Geleit [1]

Mit der heutigen Sitzung der Klasse Naturwissenschaften ehren wir unser Mitglied Wolfgang Böhme, der vor wenigen Tagen - am 11. März 2001 - sein 75. Lebensjahr vollendet hat. Korrespondierendes Mitglied der Akademie der Wissenschaften der DDR seit dem Jahre 1977 und ihr ordentliches Mitglied seit 1980, wirkte er ab 1981 als initiativreicher Vorsitzender bzw. Sekretar der seinerzeitigen Klasse Geo- und Kosmoswissenschaften, für die er in dem denkwürdigen "verdrängten Jahr" 1992 auch an jener Erklärung von Mitgliedern der Gelehrtensozietät mitgearbeitet hat, die auf der Festlichen Sitzung zum Leibniz-Tag am 26.06.1992 - der letzten Zusammenkunft der Gelehrtensozietät in dem angestammten Plenarsaal Jägerstraße 22/23 - verlesen wurde.

Nachdem sich die in dieser Erklärung ausgedrückte Erwartung, daß bei der Neukonstituierung einer Akademie im Berlin-Brandenburgischen Raum "Vernunft und Fairness walte..." und "dabei die Erfahrungen und das international anerkannte wissenschaftliche Potential der heutigen Gelehrtensozietät genutzt werden und in angemessener Weise auch im Mitgliederbestand Berücksichtigung finden" möge, nur allzu bald als schöne Illusion erwiesen hatte, war unser Jubilar folgerichtig als Mitglied einer Arbeits- bzw. Initiativgruppe an der Gründung der Leibniz-Sozietät e.V. im April 1993 beteiligt.

Wolfgang Böhmes wissenschaftliche Biographie widerspiegelt in gewissem Maße von Anfang an Phasen des Aufbruchs und des Niedergangs in der an Verwerfungen so reichen deutschen Geschichte im 20. Jahrhundert: Seine erste Veröffentlichung, vor mehr als einem halben Jahrhundert 1948 in der Zeitschrift für Meteorologie erschienen, war der nachträglichen Einarbeitung von Thermometerkorrektionen in klimatologische Monatstabellen gewidmet. Es ging um ein zeitsparendes Verfahren zur statistischen Berücksichtigung erst im Nachhinein ermittelter Instrumentenkorrekturen von Thermometern, die bei der raschen Wiederaufnahme des meteorologischen Beobachtungsdienstes in der Nachkriegszeit zunächst ohne Kenntnis ihrer Fehlercharakteristik verwendet worden waren. Und es war in bezug auf die Korrektion von Dampfdruck und relativer Feuchte nach Psychrometer-

1. vorgetragen auf der Sitzung der Klasse Naturwissenschaften der Leibniz-Sozietät am 15. März 2001 zu Ehren des 75. Geburtstages von Wolfgang Böhme.

messungen ein nichtlineares mathematisches Problem, das der Autor als Sachbearbeiter am Meteorologischen Hauptobservatorium Potsdam noch vor Aufnahme seines Meteorologiestudiums an der Humboldt-Universität aufgriff und publikationsreif löste!

Es ist hier nicht der Ort und nicht die Zeit für eine umfassende Würdigung des wissenschaftlichen Lebenswerkes des Jubilars, zumal sich dieses keineswegs als abgeschlossen präsentiert. Von den rund 100 Titeln seiner Publikationsliste - die zahlreichen Rezensionen nicht mitgezählt - entstammen 12 dem Jahrzehnt seit 1991, also nach landläufiger Vorstellung dem Rentenalter, und dies unter den bekannten diskriminierenden Bedingungen für die ehemaligen Leistungsträger der DDR.

Neben einer stichwortartigen Aufzählung der wichtigsten Arbeitsgebiete Wolfgang Böhmes - Turbulenztheorie, Theorie der allgemeinen Zirkulation der Atmosphäre, dynamische und statistische Methoden der Wettervorhersage, Physik des Klimasystems, nichtlineare Dynamik der Atmosphäre - sei wenigstens ein Charakteristikum seines wissenschaftlichen Wirkens hervorgehoben, nämlich die Hinwendung zu jeweils neu aufgeworfenen bzw. diskutierten Problemen der Meteorologie und deren souveräne theoretische Behandlung mittels analytischer Methoden und statistischer Verfahren bei umfassender Literaturauswertung.

So leistete er bereits im Anschluß an die Diplomarbeit (1953) mit seinen Publikationen über thermisch bedingte Zirkulationen in der Atmosphäre einen Beitrag zur Theorie des Monsuns im Rahmen eines seinerzeit als revisionsbedürftig diskutierten Systems der allgemeinen Zirkulation. Die unter Betreuung von H. Ertel angefertigte Dissertation über Turbulenzreibung und ageostrophische Windabweichung (1958) samt zugeordneten Veröffentlichungen und Vorträgen - so auf der Gründungstagung der Meteorologischen Gesellschaft in der DDR im Jahre 1957 - ermöglichte u. a. eine theoretisch-physikalisch wohlfundierte Deutung des damals entdeckten Nullschichteffektes.

In mehreren Publikationen und in der Habilitationsschrift (1969, Universität Rostock) wies er nach, daß die wenige Jahre vorher völlig überraschend entdeckte annähernd 26monatige Schwankung des Zonalwindes in der tropischen Stratosphäre Ausdruck eines globalen, auch in der außertropischen Strato- und Troposphäre nachweisbaren Schwankungsverhaltens ist. Dessen adäquate Simulation sollte eigentlich ein selbstverständliches Gütesiegel für jedes zu Langzeitintegrationen verwendetes globales Zirkulationsmodell sein, was aber derzeit bei weitem nicht der Fall ist. Die von Wolfgang Böhme

seinerzeit favorisierte Hypothese eines solaren Ursprungs dieser Schwankungserscheinung konnte meines Wissens bisher weder bestätigt, noch eindeutig widerlegt werden, verdient aber im Kontext mit den in neuerer Zeit vieldiskutierten Einflüssen solarer Variationen auf Schwankungen im Klimasystem nach wie vor Aufmerksamkeit.

Das Problem der Wettervorhersage in unterschiedlichen Zeitbereichen hat unseren Jubilar seit Mitte der 60er Jahre beschäftigt, wobei sich sein Grundkonzept der Kombination verschiedenartiger objektiver Vorhersagemethoden, insbesondere numerisch-dynamischer und statistischer Art, vielfach bewährt hat. Dieses Vorgehen hat eine Hoffnung der Erfüllung näher gebracht, die Max Planck in seiner Erwiderung auf die Antrittsrede des neugewählten Akademiemitgliedes Gustav Hellmann im Jahre 1912 artikuliert hatte - die Hoffnung nämlich, "daß es einmal gelingen werde, durch eine passende Kombination der statistischen und der dynamischen Methode, etwa im Sinne der Bestrebungen von V. Bjerknes, dem idealen Endziel aller meteorologischen Forschung: der Prognose, etwas näher zu kommen."

Die von Wolfgang Böhme entwickelte Konzeption zum Vorhersageproblem hat auf diesem Gebiet Forschung und operative Praxis im seinerzeitigen Meteorologischen Dienst der DDR geprägt, dem der Jubilar nach mehrjähriger Tätigkeit als stellvertretender Direktor für Forschung (1962-1966) seit 1967 als Direktor vorstand. Im Rückblick auf die Diskussion über die in verschiedenen Ländern in unterschiedlichem Sinne entschiedene Frage, ob an die Spitze eines Wetterdienstes ein Verwaltungsfachmann oder ein Wissenschaftler der Spitzenklasse gehöre - in Großbritannien wie in der UdSSR hat man beispielsweise immer der letztgenannten Lösung den Vorzug gegeben - kann jedenfalls festgestellt werden, daß sich die langjährige Wirksamkeit erst eines Horst Philipps, dann - über nahezu ein Vierteljahrhundert! - die von Wolfgang Böhme in dieser Funktion als ein Glücksfall für Forschung und Praxis wie auch für die akademische Lehre der Meteorologie in der DDR erwiesen hat, an der der Jubilar jahrzehntelang, seit 1971 als Honorarprofessor der Humboldt-Universität, ideenreich und engagiert mitgewirkt hat.

Aus persönlicher Erfahrung möchte ich hier die außerordentlich konstruktive Zusammenarbeit der Universitätsinstitute mit dem Meteorologischen Dienst hervorheben, in dessen Dienststellen unsere Mitarbeiter und Studenten ein- und ausgingen, dessen Rechentechnik sie uneingeschränkt nutzen konnten und dessen sämtliche Beobachtungsdaten ihnen - heute kaum mehr vorstellbar! - gebührenfrei zur Verfügung standen. Auch Konferenzbesuche

und die Teilnahme an internationalen Beobachtungsexperimenten - letztere unter Federführung der Akademie der Wissenschaften im Rahmen der KAPG-Kooperation der ehemals sozialistischen Länder - konnten mehrfach unter Nutzung unserer Kooperationsbeziehungen realisiert werden.

Auf das Wirken Wolfgang Böhmes in der für die atmosphärischen Wissenschaften so fundamentalen internationalen Zusammenarbeit muß noch gesondert verwiesen werden, zumal sich diese bis zur weltweiten Anerkennung der DDR im Jahre 1973 unter den bekannten, in der heutigen Geschichtsbetrachtung so gern ausgeblendeten diskriminierenden und erschwerenden Bedingungen vollzog. Seit 1966 nahm er als Arbeitsgruppen-, Kommissions- und später als Büromitglied (1974-1978) an der Arbeit des COSPAR (Committee on Space Research) teil und war unter anderem an der Planung des GARP, jenes bis dahin beispiellosen weltweiten Gemeinschaftsunternehmens zur Erforschung der Atmosphäre (Global Atmospheric Research Program, 1966-1980) beteiligt, was natürlich wiederum der Entwicklung der Meteorologie, namentlich der kosmischen Meteorologie, im eigenen Lande zugute kam.

Der COSPAR-Mitarbeit folgte ab 1979 die Tätigkeit in der Commission for Atmospheric Sciences (CAS) der Meteorologischen Weltorganisation zu Fragen der Klimaforschung, zuletzt als Leiter einer der Arbeitsgruppen, die das auf der Zweiten Weltklimakonferenz in Genf beschlossene Weltklimaprogramm ausarbeiteten. Als diese Konferenz im November 1990 in Genf tagte, war Wolfgang Böhme nach dem Beitritt der DDR zur Bundesrepublik schon auf unwürdige Weise aus dem Berufsleben verabschiedet worden. Sagen wir es für den passionierten Freizeitwanderer mit "Wanderers Gemütsruhe" (Goethe, West-östlicher Diwan, Buch des Unmuts): "Übers Niederträchtige/ Niemand sich beklage/ Denn es ist das Mächtige/ Was man dir auch sage...“ Und: "Wirbelwind und trocknen Kot/ Laß sie drehn und stäuben."

Wolfgang Böhme jedenfalls hat sich nicht resigniert vom wissenschaftlichen Leben zurückgezogen, wovon z. B. seine Vorträge und wissenschaftlichen Mitteilungen vor unserer Klasse bzw. die Publikationen in den Sitzungsberichten der Leibniz-Sozietät (1994, 1998, 1999) zeugen, in denen er mit den einfachen Mitteln des Privatgelehrten Methoden der Chaostheorie auf das Studium des Klimasystems anwendet und neue Zugänge zur Langfristprognose mittels Ensemblevorhersagen sucht. Vorträge auf nationalen und internationalen Veranstaltungen der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft sind zu weiteren Ergebnissen bei der Anwendung der Ensemble-

technik auf statistische Verfahren der langfristigen Wettervorhersage für dieses Jahr angekündigt.

Die Deutsche Meteorologische Gesellschaft, Zweigverein Berlin und Brandenburg, hat Wolfgang Böhme vor fünf Jahren aus Anlaß seines 70. Geburtstages mit einem Ehrenkolloquium gewürdigt; die Meteorologische Weltorganisation hat ihn 1998 in ihrem Bulletin im Rahmen einer Interviewreihe vorgestellt, die der Präsentation herausragender Persönlichkeiten auf dem Gebiet der atmosphärischen Wissenschaften gewidmet ist.

Die beiden Vorträge auf der heutigen Klassensitzung werden von Mitarbeitern des ehemaligen Meteorologischen Dienstes der DDR gehalten, der einen gewichtigen Teil des Lebenswerkes unseres Jubilars repräsentiert. Der Überblick über die Meteorologie in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts wird in diesem Kontext auch eine Positionsbestimmung des mit unserer Veranstaltung Geehrten ermöglichen, der Beitrag aus dem Gebiet der Hydrometeorologie demonstrieren, wie die in der Arbeit des Meteorologischen Dienstes praktizierte Nähe zur Volkswirtschaft und den Bedürfnissen der Gesellschaft - auch dies ein Credo unseres Jubilars! - fortwirkt, ungeachtet des Kahlschlags, dem nach 1990 zahlreiche Dienststellen und Forschungsinstitute zum Opfer gefallen sind, als bisher letzte Einrichtung das Meteorologische Observatorium Potsdam, eine Einrichtung von absoluter und unzweifelhafter Weltgeltung, das Ende dieses Jahres seine Tätigkeit einstellen wird.

Karl-Heinz Bernhardt
Sekretar der Klasse Naturwissenschaften der Leibniz-Sozietät

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 Phsik 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 fand[1] (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 Aschenputtel[1], hat eine derartige wesentliche Begriffserweiterung erfahren[2], dass sie als *das* Paradebeispiel eines interdisziplinären Forschungsgebiets gilt und das Dach der Meteorologie verlassen hat[3]. 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, primärTeilgebiet 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.

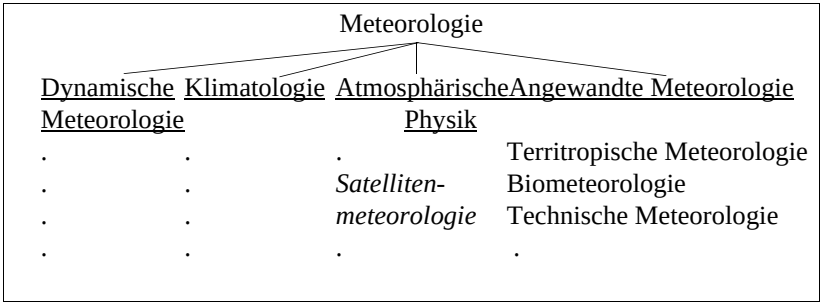


Abb.1:
Die Einteilung der Meteorologie um 1960. Auf eine weitere Unterteilung der Teildisziplinen wurde verzichtet. Siehe hierzu Flemming (1971), der bereits die Chemische Meteorologie erwähnt, und Anmerkungen 2 bis 5.

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 international[1], hat diese Möglichkeit wie alle technischen Errungenschaften in ihrer Geschichte begierig aufgenommen und genutzt.

1. Die Encyclopedia Americana (1995) beteont 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 (IQSY) 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) konzipiert[1]. Zum GARP Atlantic Tropical Experiment (GATE) im tropischen Ostatlantik 1974 zur Untersuchung der tropischen Atmosphäre und deren Rolle in der allgemeinen atmosphärischen Zirkulation wurde erstmalig ein spezieller operationeller Wettersatellit in geostationärer Umlaufplan, 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
[1]ICSU – International Council of Scientific Unions, [2]IOC – 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_2O,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**	**Treibhauseffekt**	**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_2O 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 hauptsächlichen Quellen sowie die damit verbundenen Umweltprobleme (nach Ferguson 1989, Bruce 1990)

Substanz	Einwirkung auf chemische Prozesse	Einwirkung auf Klima	Wechselwirkung Klima-Chemie
CO_2	0	2	1
O_3	2	2	2
CH_4	2	1	1
CO	2	0	1
N_2O	2	1	1
$NO_x = NO + NO_2$	2	0	1
OH	2	0	1
$CFCl_3$	2	1	1
CF_2Cl_2	2	1	1
CF_2ClBr	2	0	1
CF_3Br	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 CH_4 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)

$$O_3 + h\nu \rightarrow O(^1D) + O_2 \quad (\lambda \leq 320nm) \qquad (R1)$$
$$O(^1D) + H_2O \rightarrow 2\ OH \qquad (R2)$$

Die Bildung von OH benötigt daher Ozon, solare UV-Strahlung unter 320 nm, die Ozon zu angeregtem atomaren Sauerstoff und Sauerstoff zersetzen kann, und Wasserdampf. Die weitaus bedeutendste Senke für OH sind die Reaktionen mit CO (R3) und CH_4 (R4) mit Nachfolgereaktionen im Ozonkreislauf

$$OH + CO \rightarrow H + CO_2 \qquad (R3)$$
$$OH + CH_4 \rightarrow H_2O + CH_3, \qquad (R4)$$

die die Lebenszeit von OH auf etwa 1 bis 10s beschränken und auch die Lebensdauer von CO und CH_4 bestimmen. OH tritt in der Atmosphäre in verschwindend geringen Mengen auf, im Durchschnitt entfallen nur 4 Teilchen auf 10^{14} Luftmoleküle. Da es aber mit fast allen natürlichen und anthropogenen Gasen reagiert, - Ausnahmen sind die FCKW und N_2O, 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 HO_2, das OH in Verbindung mit NO und O_3 zurückbilden kann, in fotochemischem Gleichgewicht. Abb. 2 zeigt in einem vereinfachten Schema die Wirkung von OH und HO_2, 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 Gesamtozongehalts 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 NO_2 durch HO_2 gefunden, die durch einen katalytischen Zyklus von NO_x unter Mitwirkung von CH_4 und CO angetrieben wird (Chameides und Walker 1973, Crutzen 1974a). Das Verhältnis der Reaktionsraten von OH mit CO, O_3 und flüchtigen organischen Verbindungen (VOC: volatile organic compounds) einerseits und von HO_2 mit NO und O_3 andererseits bestimmt den jeweiligen Anteil von OH und HO_2 an HO_x. Mit zunehmendem CO oder VOC steigt der Anteil von HO_2 relativ zu OH. Die Konzentration von HO_2 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 NO_2 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.

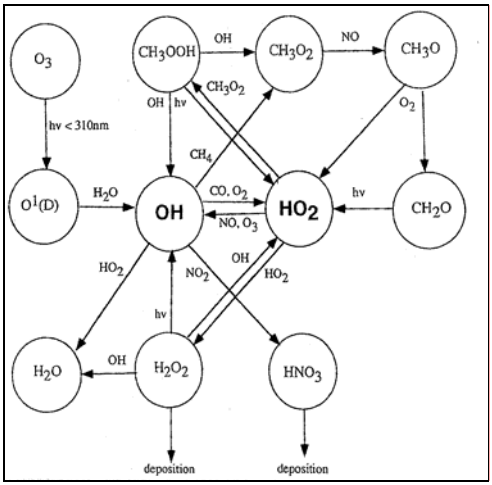


Abb. 2:
Vereinfachtes Schema der Beziehung der Radikale HO_x=OH+HO_2 auf einige weitere wichtige atmosphärische Spurenstoffe (nach Mount und Williams 1997)

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 unbekannten Reaktionsketten, der mangelnden Kenntnis der Aerosoleigenschaften in globalem Maßstab und der engen Wechselwirkung zwischen Chemie und Transport über Größenordungen von Scales (siehe Abschnitt 5) hinweg steht die Troposphärenchemie trotz beachtlicher Erfolge noch am Anfang.

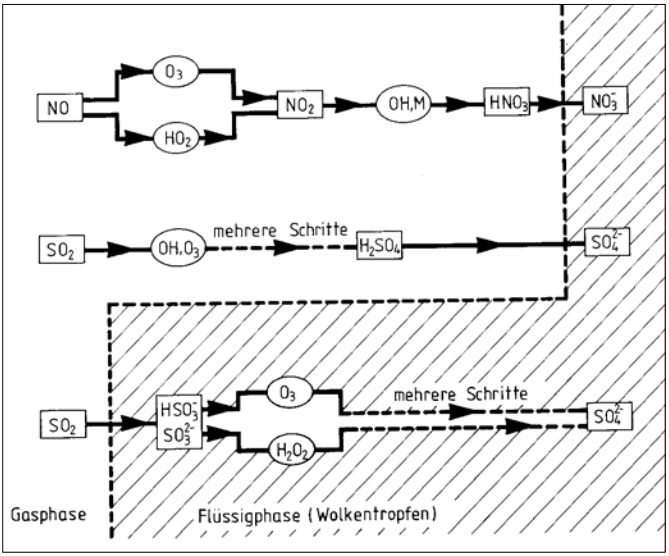


Abb. 3:
Chemische Reaktionen an Wolkentröpfchen (nach Fabian 1992)

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

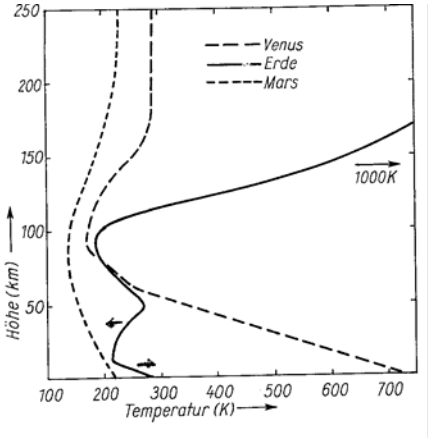


Abb. 4:
Der Temperaturverlauf als Funktion der Höhe für die Atmosphären der erdähnlichen Planeten (nach Taubenheim 1991). Die Pfeile an der terrestrischen Temperaturkurve zeigen die Wirkung anthropogener Klimabeeinflussung. Die Änderungen in der Stratosphäre sind um eine Größenordnung stärker als an 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).

$O_2 + h\nu$	$\rightarrow 2O$	$(\lambda \leq 240$ nm)	(R5)
$O + O_2 + M$	$\rightarrow O_3 + M$		(R6)
$O_3 + h\nu$	$\rightarrow O(^1D) + O_2$	$(\lambda \leq 320$ nm)	(R1)
$O_3 + h\nu$	$\rightarrow O + O_2$	$(\lambda \leq 1180$ nm)	(R7)
$O + O_3$	$\rightarrow 2O_2$		(R8)

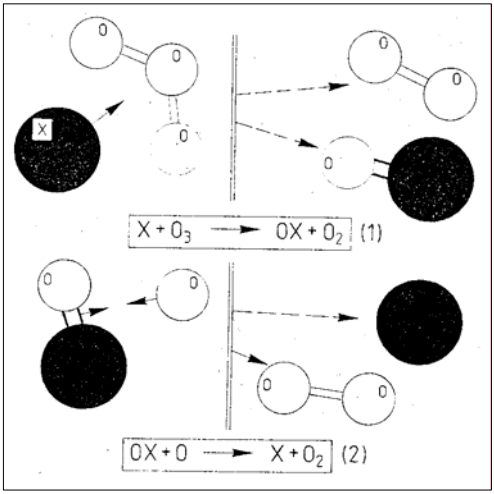


Abb. 5:
Schema der katalytischen Ozonzerstörung. X = Katalysator (NO,H,OH,Cl,Br,F)

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 voraussagt 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

$$X + O_3 \rightarrow XO + O_2$$
$$XO + O \rightarrow X + O_2$$

Netto: $O_3 + O \rightarrow 2O_2$ (R9)

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 X=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 Cicerone 1974, Wofsy und McElroy 1974, Crutzen 1974b). Stolarski und Cicerone 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 chlorofluormethanes: Chlorine atome-catalyzed destruction of ozone" (Molina und Rowland 1974).

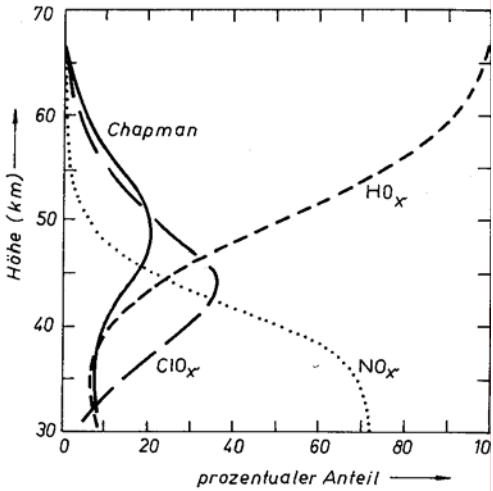


Abb. 6:
Prozentualer Anteil der Ozonabbauraten als Funktion der Höhe

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 Ausregnens 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_3F	Kühlmittel, Treibgas, Kunststoffverschäumung	50	5
CFC-12	CCl_2F_2	dito	102	5
CFC-13	$CClF_3$		640	5
CFC-14	CF_4	Aluminiumindustrie		2
CFC-113	$C_2Cl_3F_3$	Lösungsmittel Elektronikindustrie	85	10
CFC-114	$C_2Cl_2F_4$		300	
CFC-115	C_2ClF_5		1700	
Halone				
H-1211	CF_2ClBr	Feuerlöschmittel	20	20
H-1301	CF_3Br	Feuerlöschmittel	65	
H-2402	$C_2F_4Br_2$			
Wasserstoffchlorfluorkohlenwasserstoffe				
HCFC-21	$CHCl_2F$			
HCFC-22	$CHClF_2$	Kühlmittel	13	10 - 15
Sonstige				
Perfluoro-ethan	C_2F_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 O_2 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 Abfalldes 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.

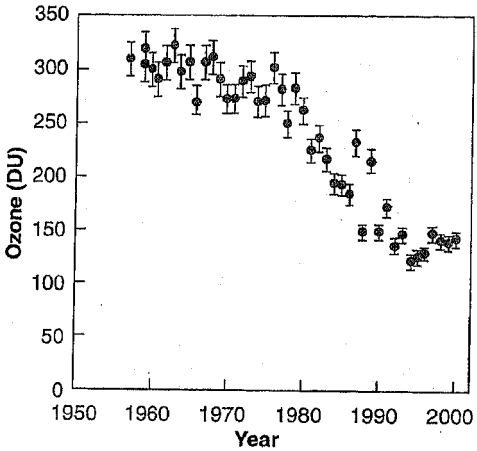


Abb. 7:
Gesamtozongehalt in Dobson-Einheiten (DU) über Halley Bay, Antarktis, (76°S) im Oktober seit 1956. 1 DU = 1x 10-3 cm Ozonschichtdicke reduziert auf Normalbedingungen (1 atm, 273 K).

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 OClO-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 (CCl_4)	Referenzproduktion des Jahres 1989 1995: 85% Reduktion 2000: Auslaufen der Produktion
Methylchloroform (CH_3CCl_3)	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
CCl_4	Ende 1995: Auslaufen der Produktion
Methylchloroform	Ende 1995: Auslaufen der Produktion
Methylbromid (CH_3Br)	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,$2Cl_2O_2$, 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.

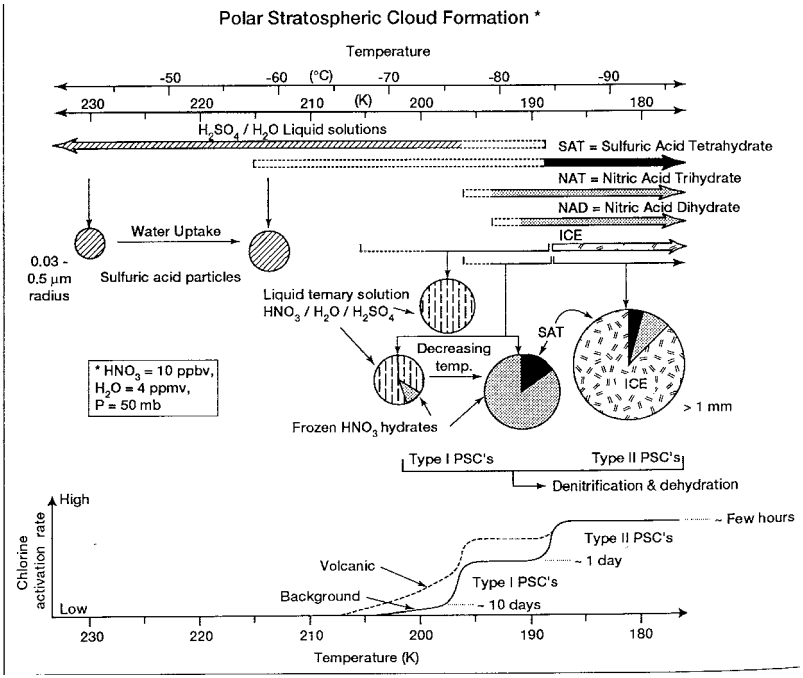


Abb. 8:
Schema der Bildung polarer stratosphärischer Wolken (PSC) als Funktion der Temperatur (oben) und Chloraktivierung an PSC in Abhängigkeit von der Temperatur (unten). An den immer vorhandenen Schwefelsäuretröpfchen in der unteren Stratosphäre, deren Existenz erst in den frühen 60er Jahren durch Christian Junge nachgewiesen worden war (Junge u.a. 1961), bilden sich zunächst ternäre unterkühlte Lösungen aus $HNO_3/H_2O/H_2SO_4$ bzw. bei Fehlen von HNO_3 SAT-Teilchen ($H_2SO_4 \cdot 4H_2O$). Beim Gefrieren der Teilchen werden die HNO_3-Hydrate stabil. Polare stratosphärische Wolken erster Art (PSC I) aus NAT- (HNO3· 3H2O) oder/und NAD-Teilchen ($HNO_3 \cdot 2H_2O$) 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, OClO) erstmals in der Venusatmosphäre vor den o.a. Arbeiten untersucht[1] (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 sind[3].

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/dlogr ~ r- 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 konnte[1].

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 berechnen[1]. 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 Datenübermittelung 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 operationellen 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 testen[2]. 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 EltronicComputer 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 Project[1] 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 barotropen[2] 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 wurden[1] (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.

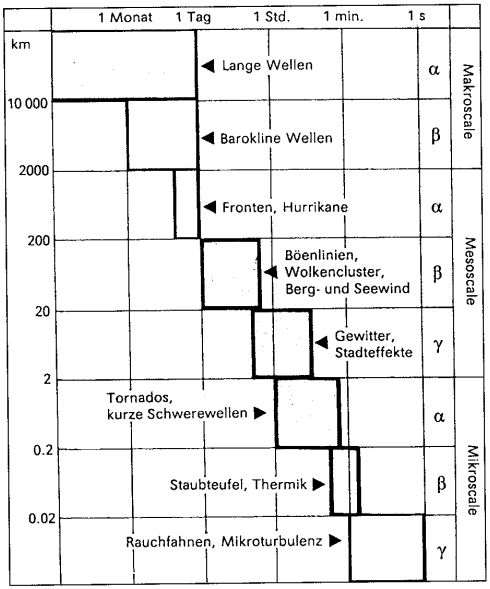


Abb. 9:
Raum-Zeit-Diagramm meteorologischer Phänomene und Prozesse nach Orlanski (1975). Die Realität besetzt nur den Diagonalbereich vom potentiell möglichen Bereich über 15 Größenordnungen im Raum und über 10 Größenordnungen in der Zeit. Prognostisch volkswirtschaftlich relevant ist der Bereich ab 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.

1. 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 Maßstabsbereich 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
Maßstäbe		
Vorhersagezeitraum	> 12 h	0-12 h
Prozessmaßstab	> 2000 km	~ 2000-2 km
Einzugsbereich	global oder hemispärisch	regional oder lokal
Daten		
zeitliche Auflösung	3-12 h	< 1 h
räumliche Auflösung	~ 100 km	~ 10-1 km
Datenumfang	~ 10^6 bits/h	~ 10^8 bits/h
Informationsverarbeitung		
Übertragungsgeschwindigkeit	~ 1h – 10 min	~ 1 min – 1s
Arbeitsteilung*	WMC, RMC, (NMC)	NMC und subnationale (regionale) Institute
Modelle	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 der zu modellierenden Prozesse etwa 1:8,

d.h. d ~ 100 km für Meso α (z.B. Fronten, Hurrikane), d ~10 km für Meso β (z.B. Regenbänder, Böenlinien) und d ~ 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).

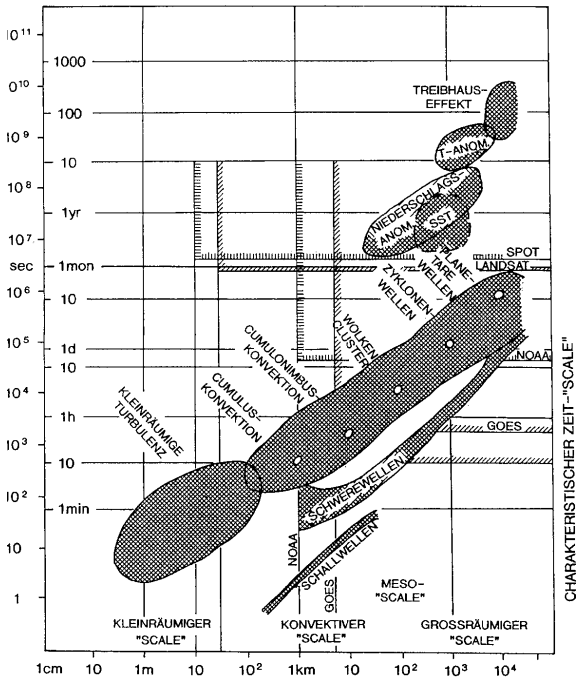
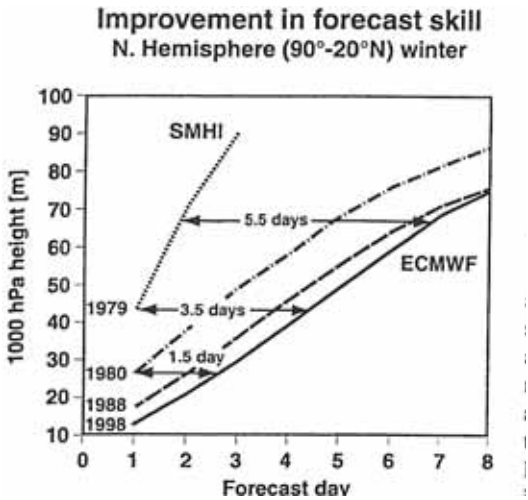


Abb. 10:
Monitoring meteorologischer Phänomene und Prozesse durch Satelliten. Fernerkundungssatelliten wie LANDSAT und SPOT mit hoher räumlicher Auflösung aber niedriger Wiederholfrequenz sind für meteorologische Prozessüberwachung nicht geeignet Für geostationäre Satelliten (wie GEOS) sind zwei Zeitbereiche 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).

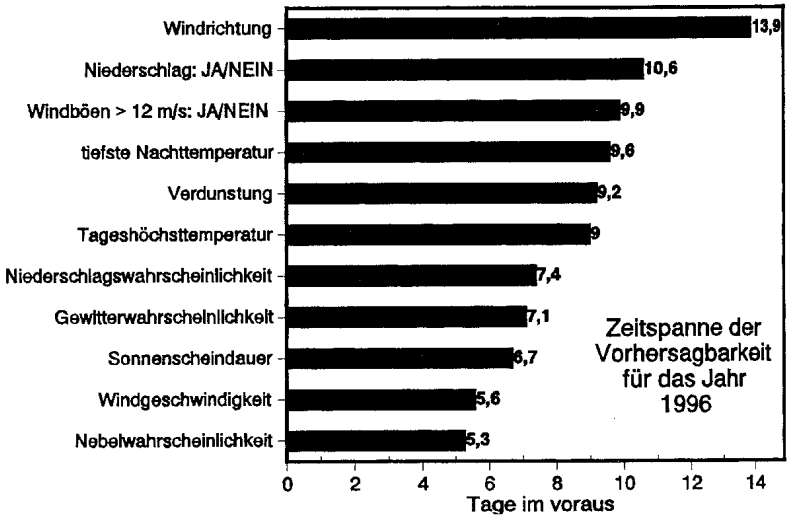


Abb. 12:
Zeitspanne der Vorhersagbarkeit einiger meteorologischer Elemente und Ereignisse für Mitteleuropa, Stand 1996. Eine Vorhersage gilt als nützlich, wenn sie über der Persistenz bzw. über der Klimaaussage liegt (Balzer u.a. 1998).

Rechner	Besk, Schweden	Fujitsu VPP 700 (16 Proz.)
Modell	MISU/MVC (1954) 1 Schicht, regional	ECMWF (1998) 31 Schichten, global (T213)
Parameter	1	~ 200
Variablenanzahl	1200	$3x10^7$
Berechnungen/Tag	$3x10^7$ (40 bit fix number)	$5x10^{12}$ (64 bit float number)
Rechenzeit	25 min	6 min*
Vorhersagezeit	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 ß-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 verbessert[1], 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 Langeweile[2]. 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).

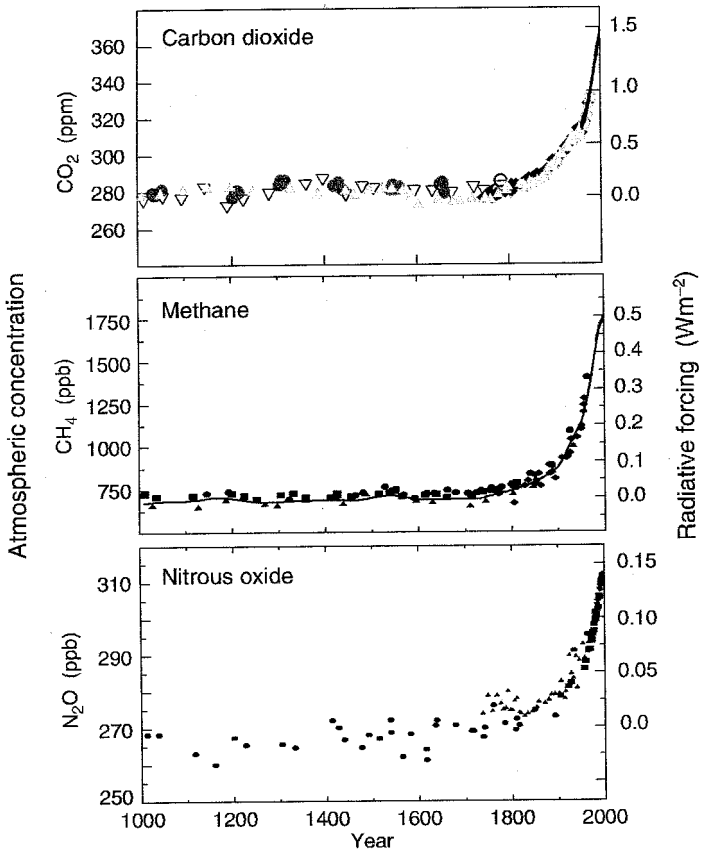


Abb. 13:
Konzentrationszunahme wichtiger atmosphärischer Treibhausgase in den letzten 1000 Jahren (nach IPCC 2001).

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 CO_2 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.

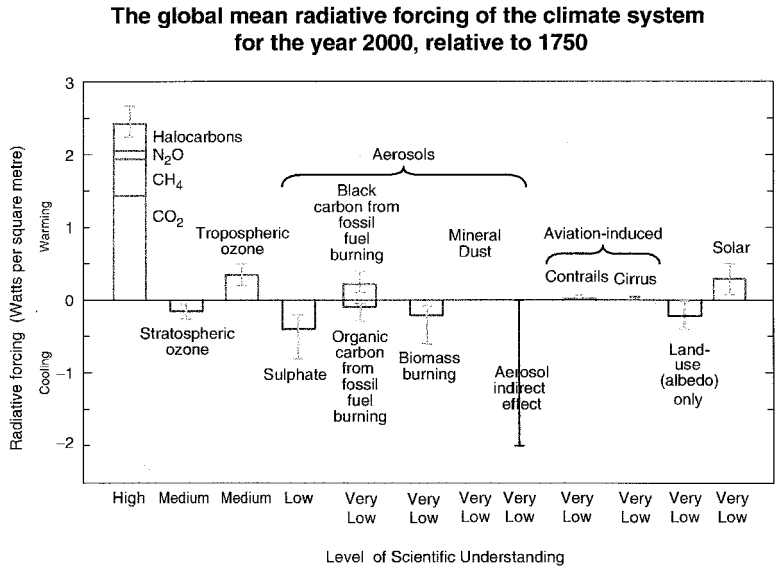


Abb. 14:
Änderung der Strahlungsbilanz der Atmosphäre (Zunahme des Treibhauseffekts) für das Jahr 2000 im Vergleich zu 1750. (nach IPCC 2001). Der Einfluss des hydrologischen Zyklus ist groß, aber selbst die Tendenz gegenwärtig nicht angebbar[1].

In Vorbereitung auf GARP wurde mit dem Konzept des Klimasystems (Abb. 15) mit seinen Teilkomponenten Atmosphäre, Hydrosphäre, Biosphäre, Lithospäre 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 jahrzehntelang 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.

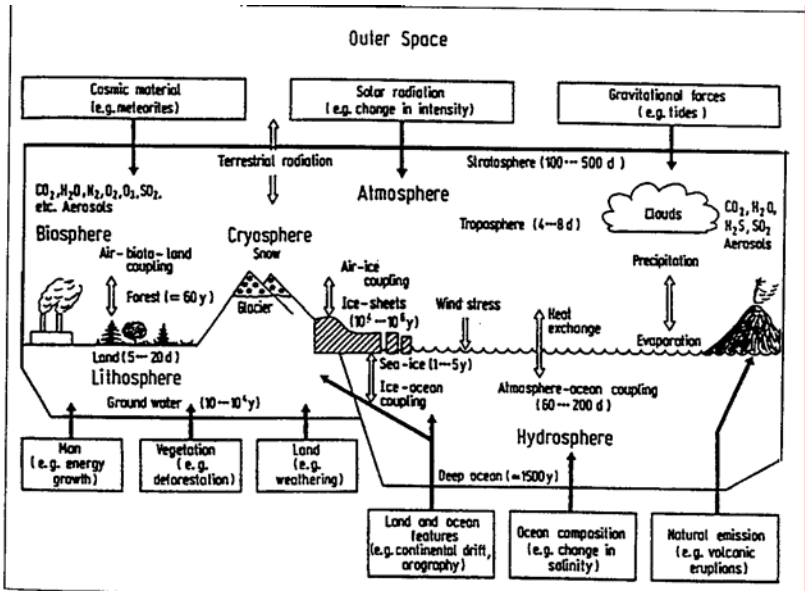


Abb. 15:
Komponenten des Klimasystems in ihrer Wechselwirkung (nach Gates 1979, Hantel 1989)

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).

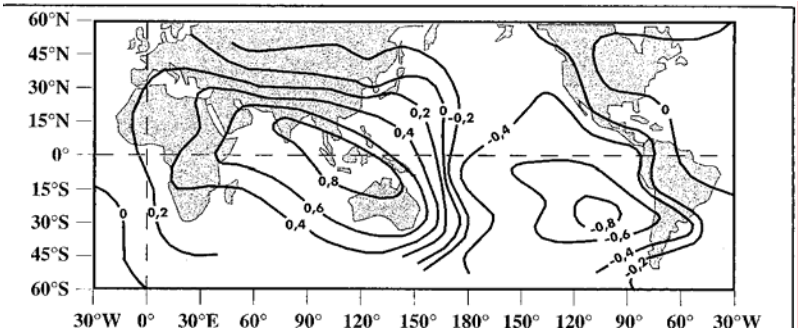


Abb. 16:
Luftdruckkorrelation der Southern Oscillation. Negative Abweichungen über dem Ostpazifik treten bei El Niño auf.

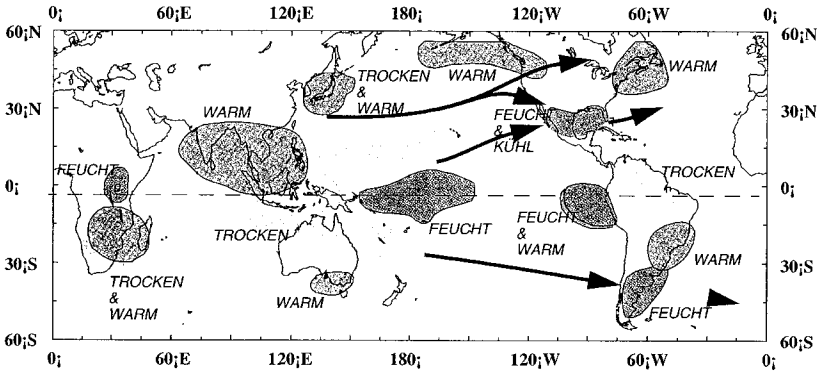


Abb. 18:
Regionale Klimaanomalien bei El Niño im Nordwinter. Muster für Nordsommer und La Niña siehe Lozán u.a. (2001)

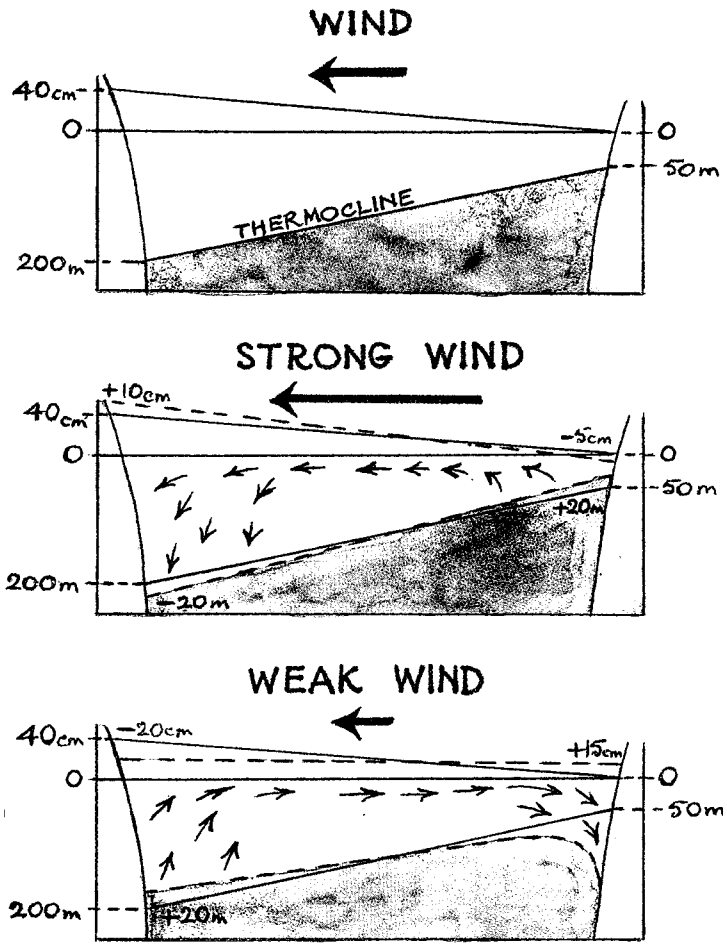


Abb. 17:
Reaktion der thermischen Struktur des äquatorialen Pazifik auf die Stärke des Passats, oben: normale Bedingungen mit Meeresspiegelanstieg und Thermohalinenabfall westwärts, Mitte: Bedingungen bei El Niña, unten: Bedingungen bei El Niño (Wyrtki 1982)

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 entwikkelt, 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.

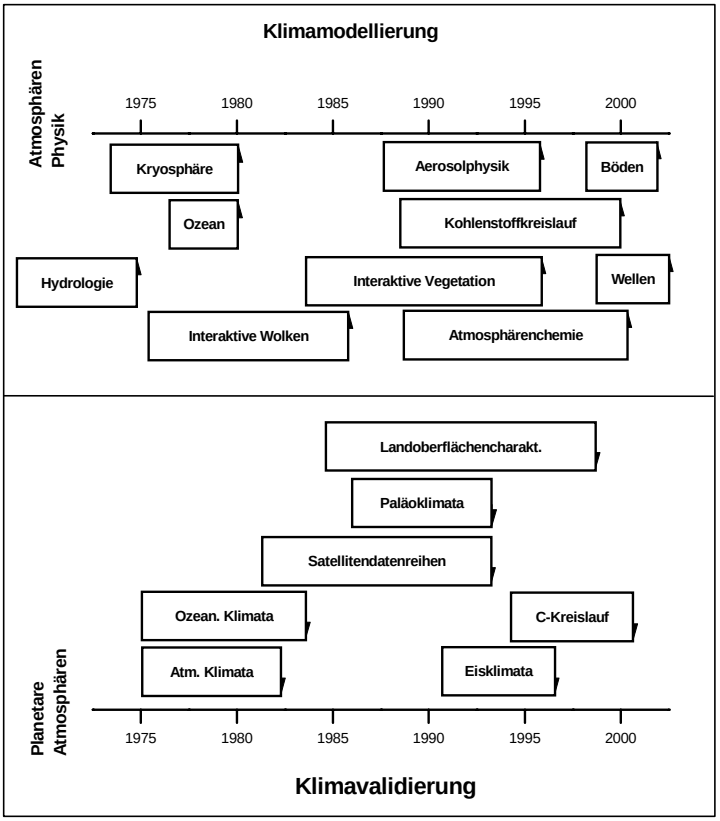


Abb. 19:
Fortschritte der Klimamodellierung und Klimavalidierung in den letzten 25 Jahren (Nach J.C.R. Hunt, zitiert nach ECSN 1995)

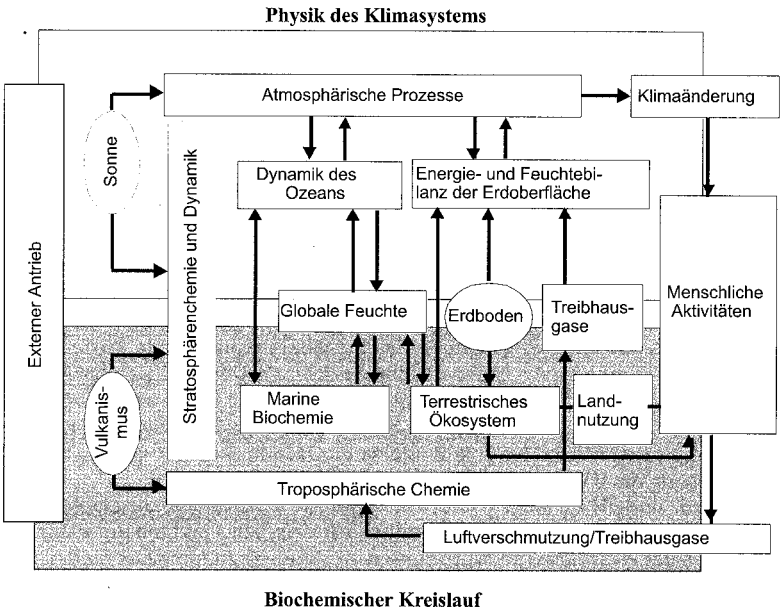


Abb. 20:
Das Klima der Erde als mehrfach rückgekoppeltes System physikalischer und biochemischer Prozesse

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 Kohlenstoffsenke 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 Härtetest 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 Nobelpreises1995 für Chemie an die Atmosphärenwissenschaftler Rowland, Molina und Crutzen3-89626-388-9.

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. Smithonian 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

Ångstöm, 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.) : Œuvres 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 nitrc 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 Svirezhev 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. und A. Ghazi, Eds.: Atmospheric ozone, D. Reidel, Dordrecht, 285-289

Clifford, S.F., J.C. Kaimal, R.J. Lataitis 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/NOx 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 Problémes Météorologiques de la Stratosphére et de la Mésosphére, 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 chlorofluorcarbons 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

Pittock, 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 15µ 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 possibile sink for ozone, Can. J. Chem. 52, 1610-1615

Svirezhev, 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: Spekat, 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): HOx, NOx and ClOx: 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

Thilo Günther

Die Rolle der Hydrometeorologie für Hochwasservorhersage und Bewirtschaftung der Wasserressourcen

1. Definition des Fachgebietes Hydrometeorologie, Schnittstellen zu Hydrologie und Wasserwirtschaft

Die *Hydrometeorologie* ist ein Teilgebiet der Meteorologie, das sich mit den Wechselwirkungen zwischen atmosphärischen Vorgängen im Wasserkreislauf und den hydrologischen Prozessen befasst (DIN 4049). Ihr fällt damit die Aufgabe zu, sich in Auswertung der Gesetzmäßigkeiten der Wechselwirkungsprozesse zwischen Atmosphäre und Hydrosphäre der Anwendung meteorologischer Informationen auf hydrologische Prozesse zu widmen, entsprechende Informationen auszuarbeiten, zu speichern und in geeigneter Form und Verdichtung nutzerfreundlich bereitzustellen bzw. abrufbereit zu halten. Während die *Hydrologie* die Wissenschaft vom Wasser, seinen Eigenschaften und seinen Erscheinungsformen auf und unter den Landoberflächen sowie in den Küstengewässern ist, beschäftigt sich die *Wasserwirtschaft* mit der zielbewussten Ordnung aller menschlichen Einwirkungen auf das ober- und unterirdische Wasser. Die Trennfläche zwischen den Wissenschaftsgebieten Hydrometeorologie und Hydrologie ist die Erdoberfläche (mit Orographie, Besiedlung, Vegetation. Bodenart usw.), deren Interaktionen mit der Atmosphäre durch die Hydrometeorologie und deren Interaktionen mit dem ober- und unterirdischen Wasser durch die Hydrologie zu untersuchen sind. Damit kann eine eindeutige Schnittstelle zwischen hydrometeorologischen und den hydrologisch-wasserwirtschaftlichen Aufgaben festgelegt werden.

2. Bedarfsentwicklung und Anwendungsgebiete hydrometeorologischer Arbeitsergebnisse

Die besondere Rolle der Hydrometeorologie für die Wasserwirtschaft ergibt sich aus der Stellung der Größen Niederschlag (einschließlich Schneedecke) und Verdunstung im Wasserkreislauf. Niederschlag und Verdunstung stellen bestimmende Input- und Steuergrößen in wasserwirtschaftlichen Systemen

dar und sind seit jeher Bestandteil meteorologischer Untersuchungen (Abb. 1, Abb. 2).

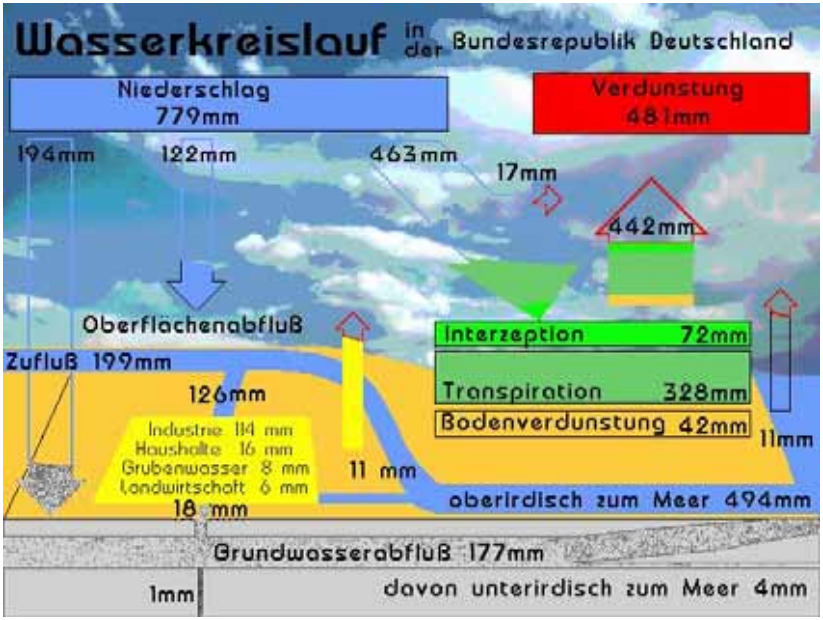
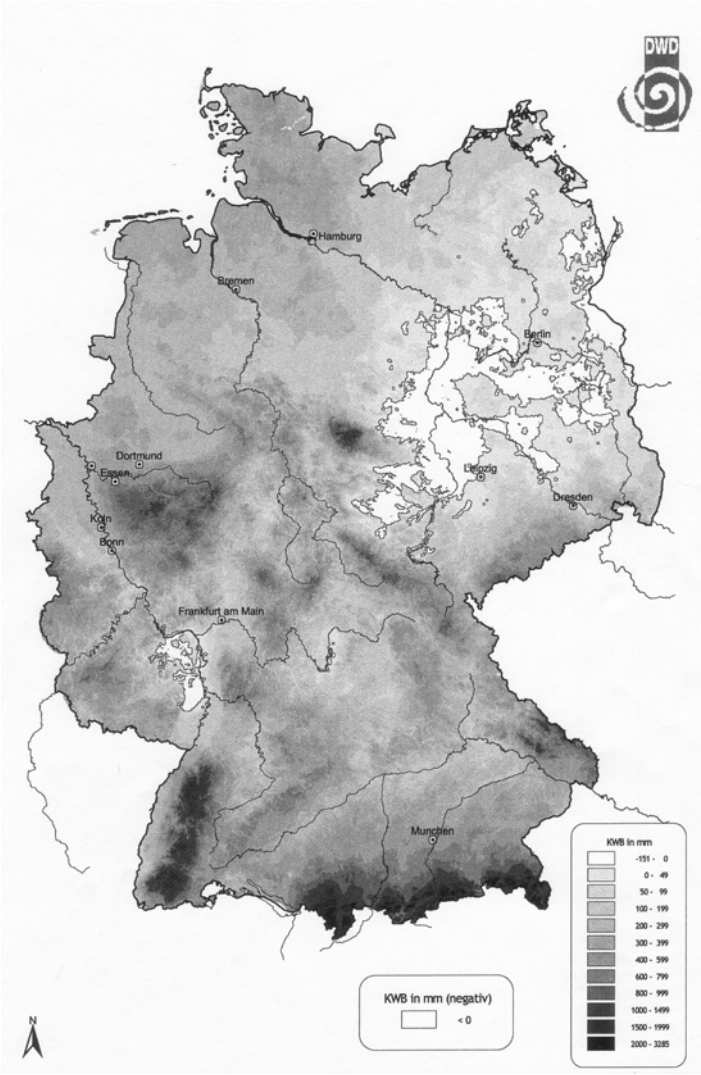


Abb. 1:
Wasserkreislauf in der Bundesrepublik Deutschland

Die zunehmend intensivere Nutzung der Wasserressourcen bei gleichbleibender bis rückläufiger Verfügbarkeit des Wasserdargebots einerseits sowie häufigere Extremereignisse andererseits führen zu ständig weiter steigenden Anforderungen an die hydrometeorologischen Arbeitsergebnisse (Daten, Produkte, Spezialdienstleistungen) und deren Anwendungen. Dies erfordert eine kontinuierliche Verbesserung und Weiterentwicklung der wetterdienstlichen Instrumentarien (Nutzung moderner Datengewinnungs- und -übertragungstechniken, Berechnungs- und Präsentationsverfahren, Gutachtenbausteine und Simulationsmodelle).

Spezielle wasserwirtschaftliche Anwendungsgebiete des hydrometeorologischen Leistungsspektrums sind in der Dimensionierung von wasserwirtschaftlichen Bauwerken, der Flussgebietsmodellierung, der Hoch- und Niedrigwasser-Analyse bzw. -vorhersage sowie in der Wasserbilanzierung zu sehen. Die Leistungen werden sowohl im Echtzeitregime einschließlich Vor-



KWB = Niederschlagshöhe minus Höhe der potentiellen Verdunstung
(Originalkarte in Farbe; vgl. Hydrologischer Atlas für Deutschland [14])

Abb. 2:
Jahreswerte der klimatischen Wasserbilanz KWB (1961-1990)

hersagen als auch im Nicht-Echtzeitregime in ausreichender räumlicher und zeitlicher Auflösung rasterorientiert und flächendeckend benötigt. In der Tendenz werden verstärkt auch Aussagen über mögliche Auswirkungen von Klima- und Landnutzungsänderungen auf das Wasserdargebot bzw. die Verfügbarkeit der Wasserressourcen erwartet.

3. Hydrometeorologische Beiträge zur Hochwasservorhersage

Die meteorologischen Ursachen für Hochwasser sind kurzzeitige Starkregen in kleinen Flusseinzugsgebieten, anhaltende Dauerregen in großen Einzugsgebieten und plötzliche Schneeschmelzen. Häufig treten diese auslösenden Ereignisse auch kombiniert auf. Für die Entstehung und den Ablauf von winterlichen Hochwasserereignissen ist aus hydrometeorologischer Sicht das Zusammenwirken von Niederschlagsgeschehen und Schneedeckenverhalten von besonderer Bedeutung. Aufgrund dieser Ursachenlage wird deutlich, dass die Ergebnissicherheit von Hochwasservorhersagen in hohem Maße von der Qualität und von der rechtzeitigen Verfügbarkeit der hydrometeorologischen Informationen abhängt. Die optimale Bereitstellung dieser Daten kann Hochwasserereignisse zwar nicht verhindern, wohl aber dazu beitragen, die Hochwasservorhersage zu verbessern und auf diese Weise Schäden zu verhüten oder wenigstens zu mindern.

Der Deutsche Wetterdienst (DWD) hat ein System der Informationsbereitstellung konzipiert und zum Teil schon realisiert, das sich auf gegenseitig ergänzende und aufeinander aufbauende Instrumentarien in Form von Niederschlags- und Schneedeckenmessungen sowie Modellrechnungen stützt.

Die einzelnen Komponenten sind:

- Automatisierung und Reorganisation des Niederschlagsmessnetzes, Aktivierung des Meldesystems
- Aufbau und Weiterentwicklung des Radarverbundnetzes, Bereitstellung quantitativer Niederschlagsdaten aus Radarmessungen (on-line Aneichung)
- Verbesserung der quantitativen Niederschlagsvorhersage mit Regional- und Lokalmodellen
- Quantitative Analyse- und Vorhersage der Schneedeckenentwicklung/ Schmelzwasserabgabe
- Quantitative Ermittlung und Echtzeitbereitstellung von Gebietsniederschlägen

Der DWD unterhält ein umfangreiches Messnetz und ein Meldesystem, durch das Tag für Tag in kurzen Abständen meteorologische Informationen

über spezielle Kommunikationswege weitergegeben werden. Zurzeit (Stand Nov. 2000) umfasst das hauptamtliche synoptisch-klimatologische Mess- und Beobachtungsnetz 123 mit Personal besetzte Wetterstationen, von denen 70 einen 24-stündigen Beobachtungsdienst durchführen und 53 autonom arbeitende automatische Wetterstationen (Wst). Das nebenamtliche Mess- und Beobachtungsnetz umfasste zum Jahresende 2000 450 Klima- und 3468 Niederschlagsstationen. Wegen der hohen räumlichen und zeitlichen Schwankung des Niederschlags reichen die in Echtzeit zu Verfügung stehenden Informationen des synoptisch-klimatologischen Messnetzes nicht aus. Daher wird auch die Automatisierung des nebenamtlichen DWD-Niederschlagsmessnetzes im Rahmen des Projektes MESSNETZ 2000 weiter vorangetrieben. Da für eine rasche Umrüstung und die aus hydrologischer Sicht gewünschte höhere Messnetzdichte die Finanzierungsmöglichkeiten des DWD nicht ausreichen, wird in fachlicher und finanzieller Kooperation mit den Bundesländern zurzeit versucht, die Modernisierung des Netzes gemeinsam zu realisieren. Dabei konzentrieren sich die Anstrengungen zunächst darauf, ein abgestimmtes fernmeldendes *Ombrometermessnetz* (für die automatische Gewinnung hochaufgelöster Niederschlagsdaten) sowie einen speziellen Meldedienst für die Abgabe von Meldungen über starken Niederschlag und den Zustand der Schneedecke insbesondere in Hochwasserentstehungsgebieten einzurichten.

Mit der Inbetriebnahme des Wetterradars in Dresden im März 2000 ist der Aufbau des *Radarverbundnetzes* des DWD abgeschlossen. Damit stehen für Deutschland flächendeckende Informationen von 16 Wetterradars zum aktuellen Niederschlagsgeschehen zur Verfügung (Abb. 3).

Auch wenn die Qualität der Niederschlagsintensitäten dieser in Echtzeit vorliegenden Radarniederschläge in unterschiedlichen zeitlichen und räumlichen Auflösungen für die hohen Anforderungen aus den hydrologischen Anwendungsbereichen noch nicht ausreicht, so ist der Vorteil der flächendeckenden Verfügbarkeit im Vergleich zu den punktuellen konventionellen Niederschlagsmessgeräten nicht von der Hand zu weisen. In Verbindung mit dem im Aufbau befindlichen automatisch fernmeldenden Ombrometermessnetz können die aktuellen Radarniederschlagsbilder, die bis zu einer Auflösung von 1 km² alle fünf Minuten verfügbar sind, für Steuerungen im wasserwirtschaftlichen Bereich, z. B. für die Hochwasservorhersage, genutzt werden. Im Rahmen eines Entwicklungsvorhabens (Projekt RADOLAN) werden gegenwärtig die operationellen Radarniederschlagsanalysen bis zu einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde durch eine Aneichung mit den

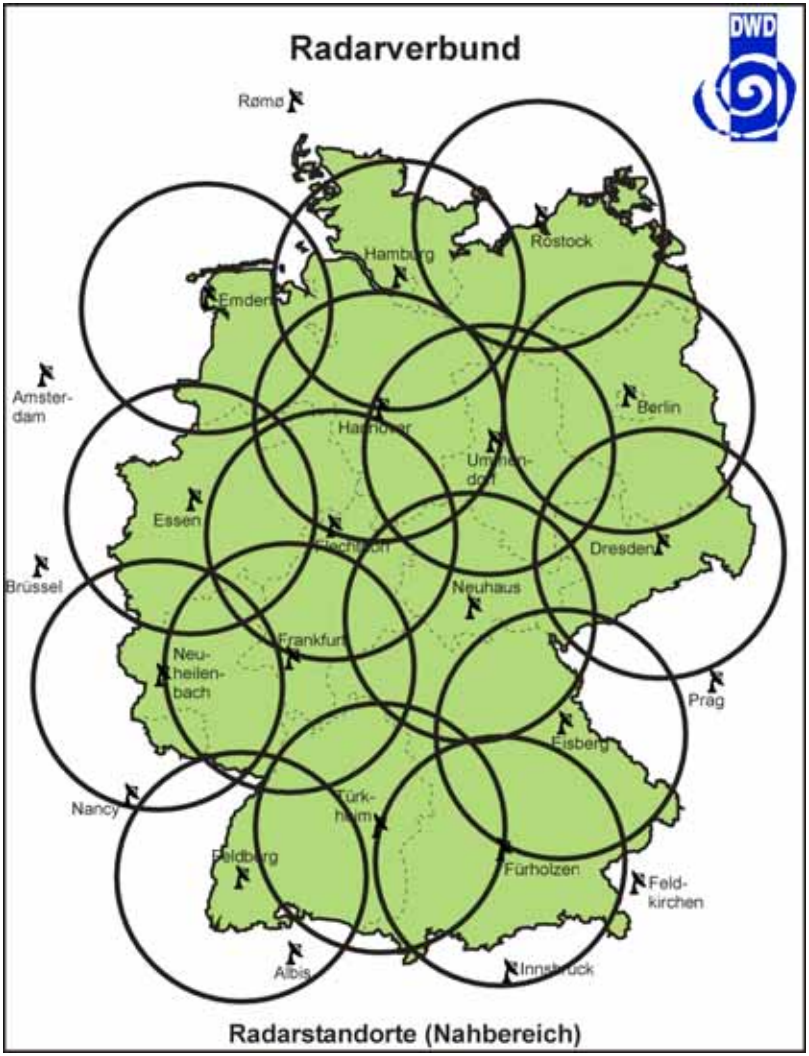


Abb. 3:
Radarverbund der DWD-Radarstandorte (Nahbereich)

Messungen der automatischen Niederschlagsstationen verbessert. Mit erfolgreichem Abschluss des Projektes werden im Jahr 2003 online-angeeichte Radarniederschlagsprodukte mit Stunden- und Tageswerten des Niederschlages

bereitgestellt. Parallel zum schrittweisen Aufbau des automatischen Ombrometermessnetzes durch das Projekt MESSNETZ 2000 wird voraussichtlich bis 2005 eine für Deutschland flächendeckende Radarniederschlagsanalyse verfügbar sein.

Nach dem endgültigen Ausbau dieser beiden Komponenten werden die Niederschlagsgebiete hinsichtlich Lage, Struktur und Intensität in Deutschland überwacht werden können. Die parallel verwendeten Satellitenaufnahmen unterstützen die Wetterüberwachung durch die Information über Typ, Verteilung und Höhe der Bewölkung. Sowohl die Niederschlagsdiagnose als auch die Niederschlagsvorhersage bis etwa 2 Stunden im Voraus profitieren davon.

Ein wichtiges Unterstützungsinstrument für eine möglichst frühzeitige Starkniederschlagswarnung ist die *quantitative Niederschlagsvorhersage* mit Hilfe der numerischen Wettervorhersage (NWV). Ende 1999 wurde im Deutschen Wetterdienst ein neues operationelles NWV-System eingeführt [1]. Es besteht aus einem Global-Modell (GME, Maschenweite 60 km, 31 Schichten) und einem nicht-hydrostatischen Lokal-Modell (LM, Maschenweite 7 km, 35 Schichten). Das LM liefert detaillierte zweitätige Wettervorhersagen für Mitteleuropa. Seit Dezember 2000 wurde durch eine Filterung der Modellorographie eine deutliche Qualitätssteigerung bei den besonders schwierigen Niederschlagsvorhersagen erreicht. An weiteren Verbesserungen der Vorhersage des hydrologischen Zyklus wird gearbeitet.

Ergänzend zu den Aktivitäten, die auf die Verbesserung der Niederschlagsdatenbasis und der numerischen Niederschlagsvorhersage gerichtet sind, wurde im Fachbereich Hydrometeorologie des DWD weiter daran gearbeitet, die Genauigkeit der flächendeckendenden Ermittlung des gefallenen Niederschlages und der Wasserabgabe aus der schmelzenden Schneedecke zu erhöhen. Mit diesem Ziel wurden die Modelle SNOW-D und BONIE entwickelt. Beide Modelle werden seit mehreren Jahren erfolgreich im Routineeinsatz angewendet.

Das *Modell SNOW-D* wurde konzipiert, um kontinuierlich die Entwicklung der Schneedecke zu simulieren und die Wasserabgabe aus der Schneedecke vorherzusagen. Die Berechnung der Schneedeckenentwicklung erfolgt mit Hilfe eines Modells, dessen physikalisch begründete Bausteine die Teilprozesse Aufbau, Umwandlung und Abbau der Schneedecke sowie die Schmelzwasserabgabe beschreiben. Als Input werden Mess- und Vorhersagedaten der meteorologischen Elemente Lufttemperatur, Luftfeuchte, Niederschlag und Globalstrahlung benötigt. Mit SNOW-D werden tägliche

rasterbezogene (7 x 7 km) Werte des Niederschlagsdargebots aus Schneeschmelze und Regen (Vorhersage 6-h-Intervalle) im Echtzeitregime für einen Vorhersagezeitraum von 48 h berechnet. Die rasterbezogenen Ergebnisse können flexibel zu beliebigen Flächenwerten (z. B. Einzugsgebieten) verdichtet werden. Die Ergebnispräsentation kann wahlweise in Kartendarstellung, als Tabelle oder als grafische Darstellung erfolgen. Darüber hinaus ist auch eine Direkteingabe in hydrologische Modelle an den Hochwasservorhersagezentren möglich [2].

Das *Modellkonzept BONIE* beinhaltet die Bestimmung von Gitterwerten der Niederschlagshöhe. Es ist ein Verfahren, das einerseits operationell zur Hochwasservorhersage und andererseits für hydroklimatologische Untersuchungen eingesetzt werden kann. Es bildet eine beliebige Menge an räumlich unregelmäßig vorliegenden Messwerten auf ein regelmäßiges Netz von Gitterpunkten ab, dessen Maschenweite derzeit in Ost-West-Richtung 6' und in Nord-Südrichtung 4' beträgt; die Gitterpunkte haben also einen Abstand von etwa sieben Kilometern. Eine Veränderung der Maschenweite ist möglich. Die Grundlage von BONIE bildet ein aus der Theorie der künstlichen Intelligenz abgeleitetes Lernverfahren. BONIE trennt anhand hinreichend langer Reihen von Tageswerten der Niederschlagshöhe in Abhängigkeit von Relief und Wetterlage verschiedene charakteristische räumliche Verteilungsmuster in einer bestimmten Analyseregion. Es leitet die unterschiedlichen mathematisch-statistischen Eigenschaften dieser Muster - vor allem die räumliche Korrelation, aber auch die Abhängigkeit vom Relief und von der geografischen Lage - ab und "erkennt" anhand der Messwerte eines konkreten Tages das zugehörige Muster. Diese Muster werden als Hintergrundfeld bezeichnet.

Mit der diesem Muster entlehnten Hintergrundinformation ist es möglich, auch bei lokalen Datenausfällen (Lükken) die räumliche Verteilung der Niederschläge genauer als durch andere Verfahren zu bestimmen. Anstelle der aus Klimadaten abgeleiteten Hintergrundfelder lassen sich im operationellen Betrieb auch Radarmessungen verwenden.

Die Analyseregionen haben eine Größenordnung von etwa 10.000 km² und sind meist mit großen Flusseinzugsgebieten bzw. deren Teilen identisch.

Die Gitterpunktwerte werden mit Hilfe des dem *Kriging* verwandten Verfahrens der statistischen Interpolation anhand aller im Gebiet verfügbaren Messwerte (und nicht nur der allernächsten) interpoliert [3].

Ein Beispiel für die mit BONIE im DWD täglich erzeugten Routineplots zeigt die Abbildung 4. Die Gebietswertberechnung erfolgt bei Bedarf durch arithmetische Mittelung der Gitterpunktwerte. Bei hinreichend geringem Git-

terpunktabstand entspricht dieses arithmetische Mittel dem räumlichen Integral der Messungen - dem tatsächlichen Gebietswert.

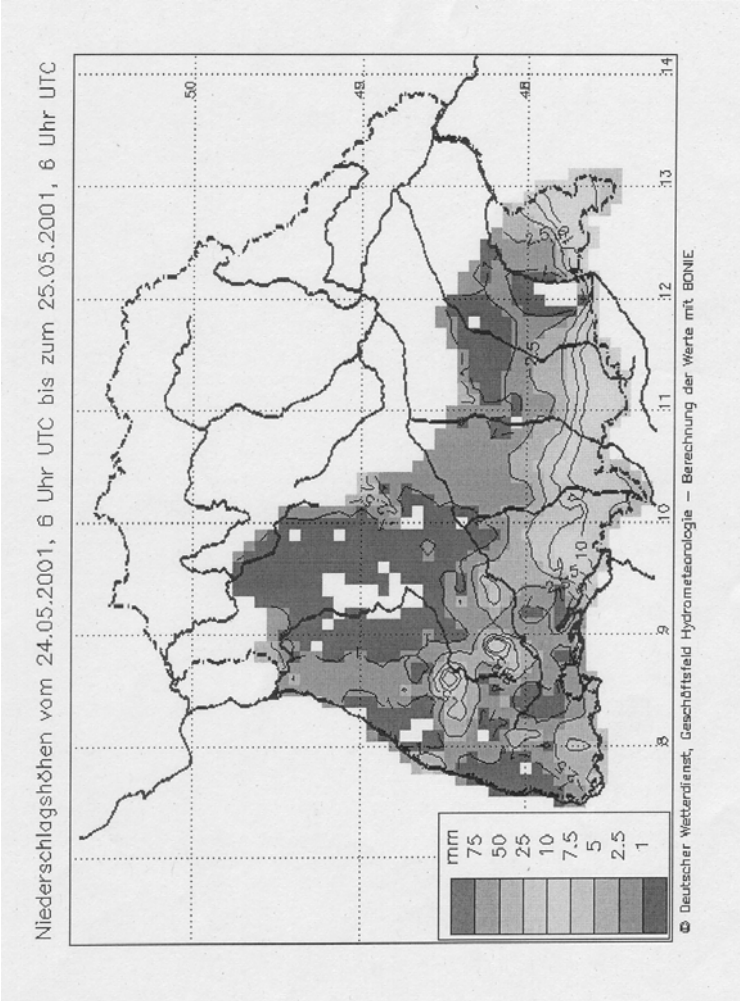


Abb. 4:
Niederschlagsanalyse mit Hilfe des Verfahrens BONIE

Die operationelle Anwendung von BONIE ist vor allem in Hochwasserentstehungsgebieten geplant.

Die jüngsten Erfahrungen in der Zusammenarbeit zwischen dem Geschäftsfeld Hydrometeorologie des DWD und den regionalen Hochwasservorhersagezentren der Bundesländer haben gezeigt, dass die bedarfsgerechte Echtzeit-Bereitstellung der hydrometeorologischen Inputdaten erheblich zur Verbesserung der Hochwasservorhersagen beiträgt.

4. Untersuchungen zu extremen Werten der Niederschlagshöhe und des Niederschlagsdargebots

Neben den Arbeiten für operationelle Zwecke werden im Fachbereich Hydrometeorologie auch statistisch-klimatologische Untersuchungen durchgeführt. Im Rahmen der KOSTRA-Projekte wurden punktuell gültige Auswertungen von Starkniederschlagshöhen vorgenommen. Der extremwertstatistische Ansatz geht von partiellen und jährlichen Serien aus, aus welchen durch Regressionsrechnung Exponential- und Gumbelfunktionen angepasst werden. Auf umfangreichen Punktauswertungen aufbauend, wurde anschließend eine flächendeckende Regionalisierung des extremen Niederschlagsgeschehens vorgenommen, so dass mithilfe der Rasterfeldkarten unmittelbar oder unter Anwendung einer Berechnungsvorschrift bundesweit für jeden Ort extreme Niederschlagshöhen $h_N(D,T)$ - bezogen auf das Jahr oder auf Jahreszeiten und in Abhängigkeit von ihrer Dauer (D) und Wiederkehrzeit (T) - ermittelt werden können [4]. Die Abb. 5 zeigt z. B. die Rasterkarte für die Dauerstufe D = 72 h, die Wiederkehrzeit T = 100 a und die Zeitspanne Mai bis September. Die räumlichen Verteilungen weisen den Alpenbereich, das Alpenvorland und den Schwarzwald als die Regionen mit den deutlich größten Starkniederschlagshöhen aus. In den Mittelgebirgsregionen treten der Höhenlage entsprechend große Werte auf. Mit einer Jährlichkeit von T = 100 a kommen jedoch auch in Tallagen oder im Lee der Mittelgebirge bedeutende Starkniederschlagsereignisse vor. Dafür sorgen außergewöhnliche Wettersituationen in Verbindung mit lokalen topografischen Effekten. Einer gesonderten Erklärung bedürfen die beträchtlichen Starkniederschlagshöhen am östlichen Rand des Bundesgebietes (s. Abb. 5), vor allem in der Lausitz und östlich des Berliner Raums. Sie sind das Ergebnis der von Zeit zu Zeit auftretenden sog. Vb-Wetterlagen, bei denen sich als Folge einer von Polen bis über Norditalien reichenden Tiefdruckzone ein umfangreiches Niederschlagsfeld ausbildet, das aufgrund der gegeneinander strömenden, unterschiedlich temperierten Luftmassen über lange Zeit immer wieder neu generiert wird.

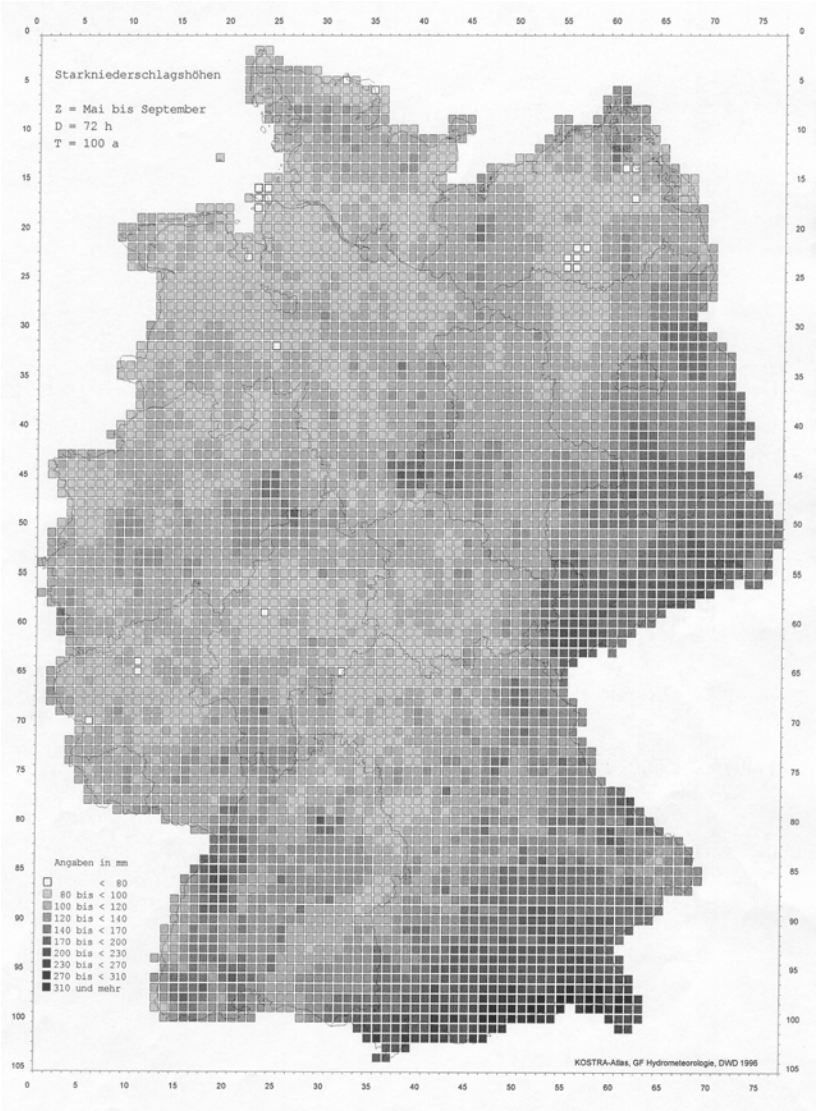
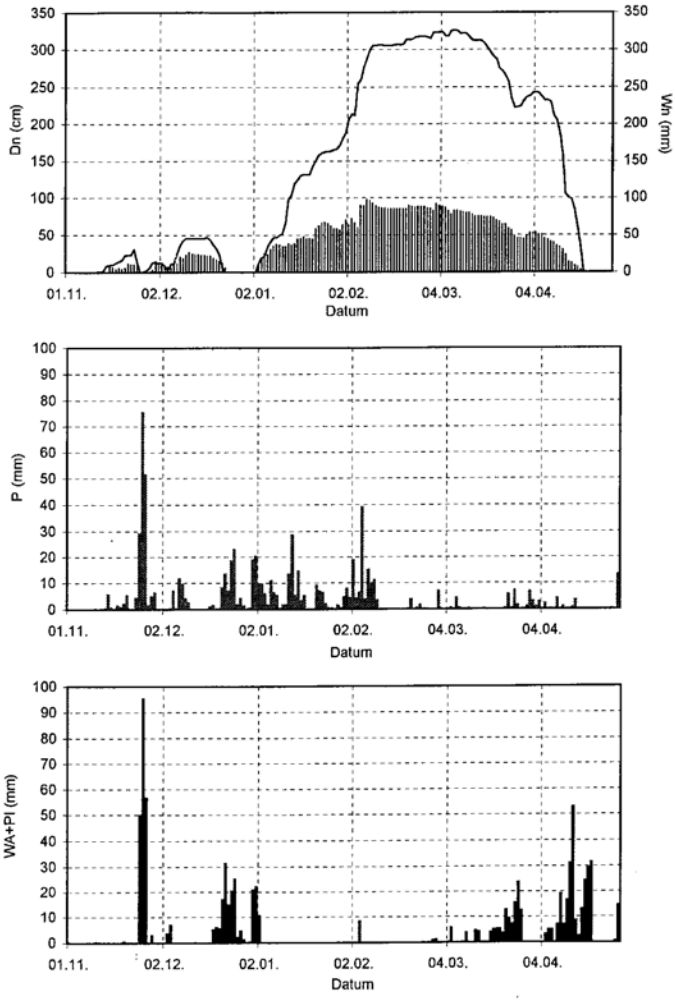


Abb. 5:
Regionalisierte punktuelle Starkniederschlagshöhen für die Zeitspanne Mai bis September, die Dauerstufe 72 h und die Wiederkehrzeit 100 a, Bundesrepublik Deutschland (Originalkarte in Farbe; s. KOSTRA-Atlas [4])

Die Starkniederschlagsauswertungen werden zur Beantwortung ganz unterschiedlicher Fragen herangezogen. Neben den hydrometeorologischen Unterlagen zur Bemessung von Entwässerungskanälen werden beispielsweise standortspezifische Modellregen (theoretische Niederschlagsereignisse mit vorgegebenem Verlauf der Niederschlagsintensität) im Kurzzeitbereich abgeleitet. Ein anderes Anwendungsgebiet ist die Dimensionierung von Regenrückhaltebecken und Talsperren. Oftmals gilt es auch zu beurteilen, inwieweit ein schadenverursachender Niederschlag als "seltenes Ereignis" angesehen werden muss.

Bei hydrologischen Extremwertuntersuchungen für das Winterhalbjahr, z. B. Analysen von winterlichen Hochwasserereignissen, muss der Einfluss der Schneedecke auf den Wasserhaushalt berücksichtigt werden. Da die im Winter fallenden Niederschläge in der Schneedecke gespeichert werden können, kommen sie nicht unmittelbar zum Abfluss, sondern erst nach längerer Zeit (bis zu Monaten). Die hydrologische Wirksamkeit von (extremen) Winterniederschlägen wird somit bei Vorhandensein einer Schneedecke durch die zeitliche Verzögerung von Ablagerungs- und Schmelzprozessen modifiziert. Bei Zusammentreffen intensiver Schneeschmelze mit starken Regenniederschlägen können Extremwerte auftreten, die in ihrer Höhe und auch Intensität vor allem in schneehydrologisch relevanten Gebieten die Extremwertstatistik entscheidend beeinflussen. Das bedeutet, dass die Bemessung von wasserwirtschaftlichen Anlagen, wie z. B. Dämmen, Deichen oder Talsperren auf der unsicheren Seite liegt, wenn der Schmelzwasseranteil vernachlässigt wird. Das trifft auf Gebiete in mittleren und höheren Lagen der Gebirge (> 400 m ü. NN) in besonderem Maße zu.

Abb. 6 veranschaulicht am Beispiel einer ausgewählten Winterperiode die Verteilung des Niederschlags bzw. des Niederschlagsdargebots (Summe von Schmelzwasser und Regen). Deutlich erkennbar sind die Unterschiede in der Verteilung des *gefallenen* Niederschlags P (Abb. 6, Mitte) und des *hydrologisch wirksamen* Niederschlagsdargebots WP (Abb. 6, unten). Die Speicherung des Niederschlags in der Schneedecke über mehrere Monate (Abb. 6, oben) verursacht zwischen Anfang Januar bis Ende Februar 1984 - mit eintägiger Unterberechung - eine aus hydrologischer Sicht ca. 60-tägige "Trockenperiode" mit allen Konsequenzen für das Abflussgeschehen. Die in dieser Periode gespeicherten Wasseräquivalente werden dann in der intensiven Schmelzperiode Anfang April 1984 mit Schmelzbeträgen (verstärkt durch Regen) bis zu 243 mm in zehn Tagen abgebaut.



oben: Schneedeckenhöhe(Dn, Balken) und Wasseräquivalent (Wn, Linie)
Mitte: Niederschlagshöhe (P)
unten: Niederschlagsdargebot (WP): Summe der Wasserabgabe aus der Schneedecke (WA) und Regen (Pl)
Station: Braunlage, Winter 1983/84

Abb. 6:
Verteilung des Niederschlags bzw. des Niederschlagsdargebots in einer Winterperiode

Um den Einfluss der Schneedeckenentwicklung auf die regionale Verteilung extremer Niederschlagsdargebote flächendeckend für ganz Deutschland zu untersuchen, wurde das Projekt "Regionalisierung der Extremwerte der Wasserabgabe aus Niederschlag und Schneedecke (REWANUS)" durchgeführt. Ziel dieses Projekts war - in Anlehnung an die Methodik und Präsentationsform der KOSTRA-Untersuchungen - die Bereitstellung flächendeckender, rasterorientierter Angaben von Extremwerten des Niederschlagsdargebots im hydrologischen Winterhalbjahr in Kartendarstellungen (Rasterung 8,5 x 8,5 km) und als Zugriffsroutine. Die Ergebnisse liegen als REWANUS-Atlas [5] in 21 farbigen Karten (Dauerstufen D = 12, 24, 48, 72, 120, 168, 240 Stunden; Wiederkehrzeiten T = 1, 10, 100 Jahre) vor.

Um die Relevanz der abflusswirksamen Größe Niederschlagsdargebot, die auch die Schmelzwasserabgaben berücksichtigt, zu verdeutlichen, wurden die Abweichungen zwischen den Extremwerten dieser Größen und den KOSTRA-Starkniederschlagshöhen ermittelt. Die Abweichungen - bezogen auf alle Rasterflächen - betrugen im Mittel zwischen +15 % (Dauerstufe D = 1 Tag) und +25 % (Dauerstufe D = 3 Tage). Mit Zunahme der Dauerstufe steigt der Einfluss der Schneedecke auf den Extremwert. In einigen besonders schneehydrologisch relevanten Gebieten können die Abweichungen Werte um + 100 % annehmen [6]. In Abb. 7 wird für den Süden Deutschlands die prozentuale Abweichung der Extremwerte des Niederschlagsdargebots von den KOSTRA-Starkniederschlagshöhen für die Dauerstufe D = 3 Tage und T = 100 Jahre dargestellt. Die REWANUS-Ergebnisse bestätigen die Bedeutung der Größe Niederschlagsdargebot (Summe aus Regen und Schmelzwasserabgabe). Die durch die Schneedeckenentwicklung modifizierte Extremwertverteilung in den Wintermonaten führt zu höheren Extremwerten und veränderten Eintrittswahrscheinlichkeiten, deren Vernachlässigung zu gravierenden Fehleinschätzungen bei der Bemessung von wasserwirtschaftlichen Anlagen und hydrologischen Extremwertuntersuchungen (z. B. extreme Hochwasserabflüsse) führen kann.

Die KOSTRA- und REWANUS-Untersuchungen liefern noch keine Aussagen zu extremen Gebietswerten und keine Aussagen zu oberen Grenzwerten. Daher wurde in einem weiteren Arbeitsschwerpunkt "*Maximierte Gebietsniederschlagshöhen in Deutschland*" ermittelt. Die Ergebnisse liegen ebenfalls in Karten- bzw. Tabellenform vor und stecken die Größenordnung der unter den gegebenen Klimaverhältnissen vermutlich größten Gebietsniederschlagshöhen in Abhängigkeit von der Dauerstufe, der Gebietsgröße und der Jahreszeit ab. Die Ergebnisse wurden mittels einer einheitlichen Methode

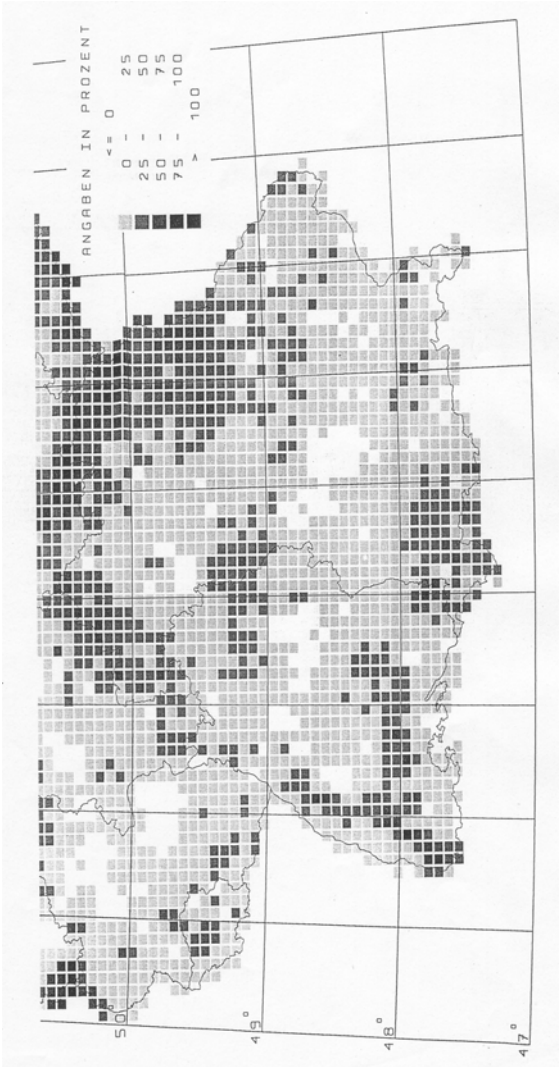


Abb. 7:
Rasterbezogene Differenzen zwischen den Extremwerten des Niederschlagsdargebots (Schmelzwasser und Regen) und den Starkniederschlagshöhen nach KOSTRA (in Prozent).
Winterhalbjahr, Dauerstufe D = 72 h, Wiederkehrzeit T = 100a,
Zeitraum 1951/80 (Ausschnitt Süddeutschland)

auf dem Wege einer physikalisch/klimatologisch sinnvollen Maximierung tatsächlich stattgefundener Starkniederschlagsereignisse erzielt und unter Verwendung eines Regionalisierungskonzeptes auf die gesamte Bundesrepublik übertragen [7, 8].

5. Hydrometeorologische Spezialdienstleistungen zur Wasserhaushaltsüberwachung und Langfristbewirtschaftung

Niederschlag, potentielle und/oder tatsächliche Verdunstung unter Berücksichtigung der Flächennutzung sowie die Bilanzen aus Niederschlag und den genannten Verdunstungsgrößen sind die wichtigsten hydrometeorologischen Basisgrößen für die Wasserhaushaltsmodellierung und die meteorologische Standort- und Gebietsbewertung zur Langfristbewirtschaftung der Wasserressourcen. Die in den Wasserhaushaltsmodellen benötigte zeitliche Auflösung dieses hydrometeorologischen Dateninputs reicht je nach Problemstellung vom Tageswert bis zu mittleren Monats- und Jahreswerten, die räumliche Auflösung vom repräsentativen Punktwert bis zum Flächenmittelwert bzw. zur Darstellung der genannten Größen in Form von Rasterwerten. Die Abhängigkeit des Verdunstungsprozesses von der Art der verdunstenden Oberfläche (Vegetationsdecke, Gewässer, Versiegelung) erfordert zudem eine flächendifferenzierte Berechnungsweise durch Definition von Hydrotopen und Berücksichtigung ihrer verdunstungsrelevanten nichtmeteorologischen Eigenschaften. Zur rationellen Bearbeitung der vielfältigen Anfragen aus Hydrologie und Wasserwirtschaft wurde zur Bereitstellung des benötigten hydrometeorologischen Dateninputs ein umfassendes, in seinen Modulen aufeinander abgestimmtes Modellpaket entwickelt, welches für die Wasserhaushaltskomponente Verdunstung in "GEBVER" zusammengefasst ist. GEBVER ist ein Modellsystem zur Berechnung und Präsentation der Verdunstung (potentielle, tatsächliche Verdunstung), des korrigierten Niederschlags und der Bilanzen auf der Grundlage von Messdaten des meteorologischen Standardmessnetzes [9, 10]. Die Berechnungsmodule umfassen im Bereich der *potentiellen* Verdunstung alle in der hydrologischen Modellierung gebräuchlichen Berechnungsverfahren. Zur Berechnung der *tatsächlichen* Verdunstungshöhen liegen die erforderlichen Module für die verschiedenen Flächennutzungsarten (Vegetationsflächen, versiegelte Flächen, Gewässerflächen) sowie für die Berechnung und Darstellung von Gebietswerten vor. Zur Berechnung der tatsächlichen Verdunstung und zur Berechnung der Bilanzgrößen werden als Modellinput nur Niederschlags-

daten eingesetzt, die um den systematischen Fehler der Niederschlagsmessung (beim Hellmann-Standardgerät immer Verluste infolge Wind-, Verdunstungs- und Benetzungseinfluss) korrigiert wurden. Das Korrekturverfahren ist integraler Bestandteil von GEBVER (s.Abb.8).

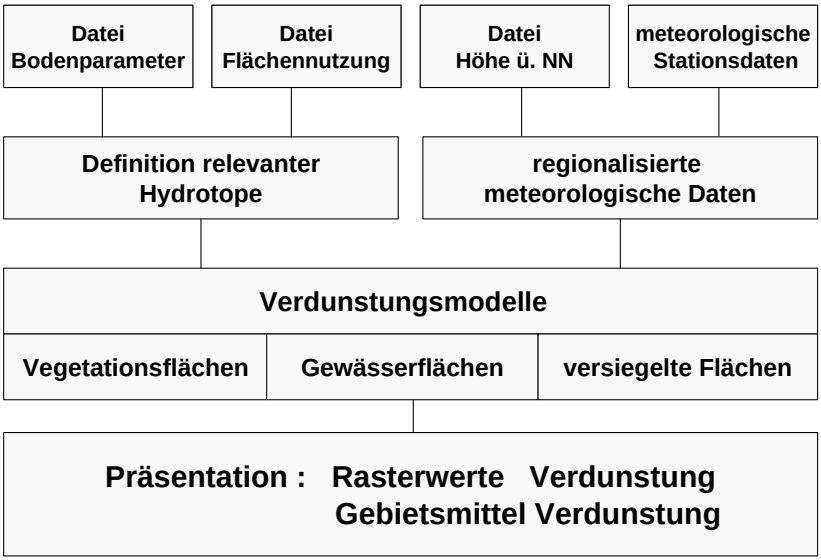


Abb. 8:
GEBVER - Modellsystem zur Berechnung der Gebietsverdunstung

6. Hydrometeorologische Untersuchungen zum Problem Klimaveränderungen

Nach den Feststellungen im "Third Assessment Report-Climate Change 2001 des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) wird für die nächsten 100 Jahre mit einer Erhöhung der mittleren globalen Lufttemperatur um 1,4 bis 5,8 K gerechnet [11]. Eine solche signifikante "Klimaveränderung" hat auch spürbare Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, da ein Temperaturanstieg allgemein zu einer Intensivierung des hydrologischen Kreislaufs führt. Die Folgen sind: Erhöhte Verdunstungs- und Niederschlagsraten. Für die Wasserwirtschaft können sich signifikante Veränderungen der mittleren

Größen sowie Veränderungen im Schwankungs- und Extremverhalten ergeben. Betroffen davon wären die Oberflächenabflüsse (Niedrigwasser, Hochwasser) in Größe und Häufigkeit, der Bodenwasserhaushalt und die Grundwasserneubildung.

Im Interesse der Wasserwirtschaft galt es zu untersuchen, ob die sich global abzeichnende Klimaveränderung an den hydrometeorologischen Grundgrößen Niederschlag einschließlich Schneedecke und Verdunstung in Deutschland nachweisen lässt. In einem von der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser LAWA geförderten Projekt wurde auf der Basis einer umfangreichen Datengrundlage und unter Einsatz verschiedener statistischer Methoden (Zeitreihenanalyse) eine gründliche Untersuchung des Langzeitverhaltens dieser Größen vorgenommen. Das Gesamtziel des Projektes bestand in der Gewinnung und Bereitstellung detaillierter und regional differenzierter Informationen über die Variabilität der hydrometeorologischen Größen für verschiedene Zeit- und Raumbereiche und die Aufdeckung eventueller systematischer Veränderungen (Trends). Die umfangreichen Ergebnisse der Untersuchungen liegen in vier Teilberichten [12] vor.

Im Langzeit- und Trendverhalten ergaben sich jahreszeitlich differenzierte Bilder und markante Unterschiede zwischen den Stationen in der maritim beeinflussten Klimaregion sowie im Süden einerseits und den östlich gelegenen Stationen im Übergang zum kontinental geprägten Klima. So zeigen die *Jahreswerte der Niederschlagshöhe* im Zeitraum 1891 bis 1997 in Hamburg, Karlsruhe und München einen positiven linearen Trend, in Potsdam und Bamberg keine signifikante tendenzielle Veränderung (Abb. 9, Tab. 1). Die Trendbefunde stehen im Einklang mit den Ergebnissen bei Rapp und Schönwiese [13], die eine Niederschlagszunahme im westlichen und südlichen Teil Deutschlands und keine tendenziellen Veränderungen der jährlichen Niederschlagshöhe im östlichen Teil erkennen lassen.

Von großer Bedeutung für hydrologische Problemstellungen sind neben den Befunden zu den Jahreswerten Änderungen in der *innerjährlichen Verteilung der Niederschlagshöhen*, da Zu- oder Abnahmen der Niederschlagshöhen je nach Jahreszeit unterschiedliche Wirksamkeit im Wasserhaushalt aufweisen. Die Analyseergebnisse zu Niederschlagstrends in den einzelnen Monaten bzw. in den hydrologischen Halbjahren werden in Tab. 1 zusammengestellt. In der jahreszeitlichen Verteilung ist an allen untersuchten Stationen eine Zunahme der Winterniederschläge festzustellen.

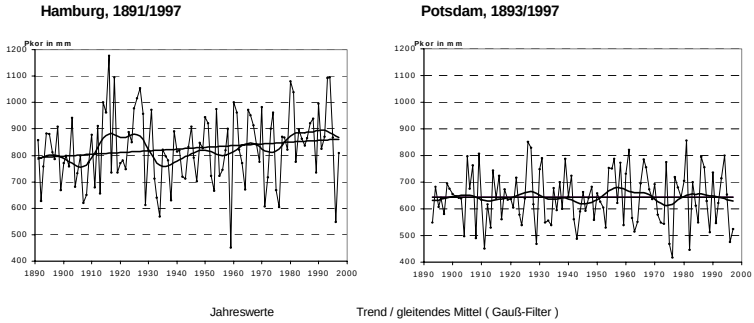


Abb. 9:
Zeitlicher Verlauf der Jahreswerte der korrigierten Niederschlagshöhe (Pkor) von Hamburg und Potsdam, Reihe 1891(93) / 1997

Station	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR	SO	WI
Potsdam	-2,3	+6,6	+2,8	+3,0	+3,3	+16,2	**-36,4**	+2,4	-6,9	-13,4	+7,5	+17,6	+0,6	-34,7	+35,3
Bamberg	-2,4	+4,8	+8,1	0,0	+0,5	+12,8	-7,7	-11,9	-6,6	-5,9	+8,5	+12,8	+12,9	-18,8	+31,7
Hamburg	+6,4	-6,7	+13,7	-5,3	+6,7	+13,7	-10,8	-8,1	+16,8	-8,2	**+30,4**	+21,1	**+69,7**	+10,0	**+59,7**
Karlsruhe	+7,9	+18,1	-3,8	-2,6	+26,3	+20,8	-10,3	-20,9	-25,1	-5,7	**+17,6**	+11,0	+33,4	-14,7	+48,2
München	-8,2	+11,6	+6,9	-7,5	+6,7	+16,9	+6,5	+17,8	-21,1	+0,8	**+28,1**	+12,2	+70,7	+27,6	+43,1

unterstrichene Werte: Irrtumswahrscheinlichkeit < 10 %
fett gedruckte Werte: Irrtumswahrscheinlichkeit < 5 %
So/Wi: hydrologische Halbjahre

Tabelle 1:
Monats-, Halbjahres- und Jahreswerte des linearen Trends der korrigierten Niederschlagshöhe (in mm), 1891/1997

Es wurde auch das langzeitliche Verhalten der *Anzahl der Niederschlagstage* mittels Trendanalysen untersucht. Als zweckmäßiger Grenzwert für eine Unterteilung in Tage mit weniger ergiebigen bzw. ergiebigen Niederschlägen wurde eine tägliche Niederschlagshöhe von 3,0 mm vorgegeben. Die Abb. 10 und 11 zeigen am Beispiel der Station Potsdam das Trendverhalten der Anzahl aller Niederschlagstage und der Niederschlagstage bei Differenzierung nach der täglichen Niederschlagshöhe. Der Trend der Anzahl der Tage mit geringem Niederschlag ($N \leq 3{,}0$ mm Tag) ist signifikant negativ, während er für die Anzahl der Tage mit über 3 mm Niederschlagshöhe praktisch unverändert bleibt.

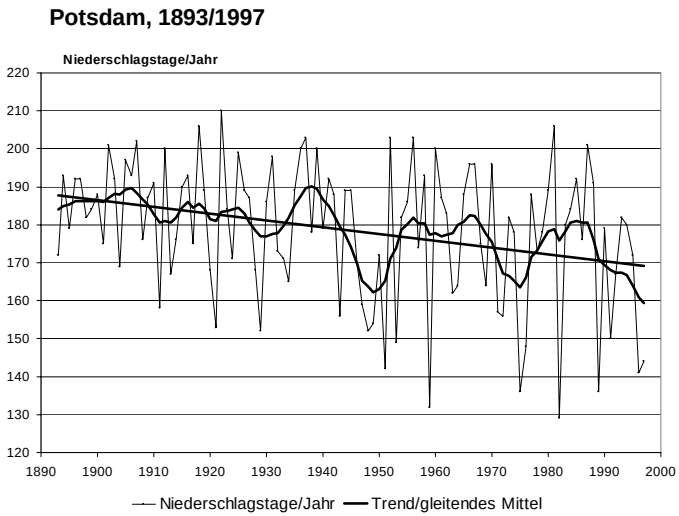


Abb. 10:
Anzahl der Niederschlagstage (N (0 ≥ 1 mm) im Jahr, Potsdam 1893/1997

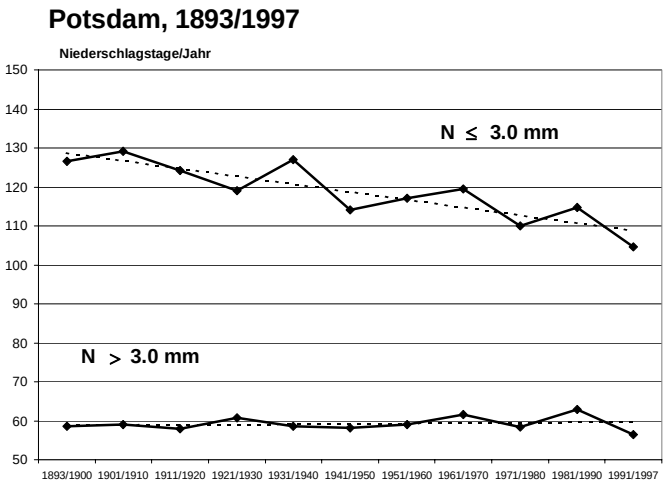


Abb. 11:
Gang der 10-jährig gemittelten Anzahl der Niederschlagstage, getrennt nach der täglichen Niederschlagshöhe (mm), Potsdam 1893/1997

Die *sommerlichen Starkniederschläge* von weniger als einer Stunde Dauer haben im Westen und Süden Deutschlands tendenziell an Intensität zugenommen. Im Osten Deutschlands kam es in den 80er Jahren seltener zu Starkniederschlag als in jedem anderen 10-jährigen Abschnitt des Zeitraums 1951 - 1980. Das Starkniederschlagsgeschehen ab 1991 ist im Osten Deutschlands dadurch charakterisiert, dass die Starkniederschläge im Kurzzeitbereich zwar ebenso selten wie in den 80er Jahren sind, dafür aber mit höherer Intensität. Die Analyse der zeitlich hoch aufgelösten Zeitreihen der Niederschlagshöhe hat für Deutschland kein einheitliches Verhalten bzgl. der sommerlichen Kurzzeitniederschläge ergeben. Auffälligstes Merkmal aller Untersuchungsergebnisse ist, dass Häufigkeit, Dauer und Ergiebigkeit der Niederschlagsereignisse von Jahr zu Jahr großen Schwankungen unterliegen.

Die *potentielle Verdunstung* und die *Verdunstungsverluste von Gewässeroberflächen* zeigen an fast allen untersuchten Stationen (außer Karlsruhe) eine signifikante Zunahme der Jahreswerte mit dem Schwerpunkt des Anstieg im Sommerhalbjahr (Abb. 12, Tab. 2). Starke Zunahmen der potentiellen Verdunstung sind allgemein in den Monaten Juli/August, an der Station Hamburg auch im Januar/Februar, zu verzeichnen.

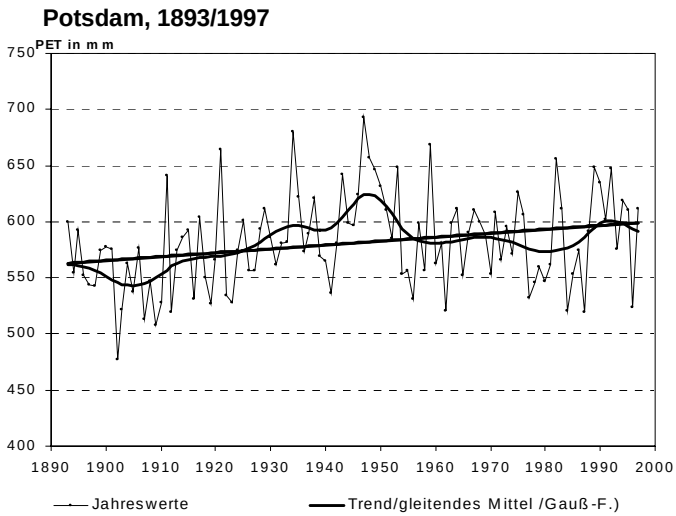


Abb. 12:
Zeitlicher Verlauf der Jahreswerte der potentiellen Verdunstung (Turc/Ivanov) von Potsdam, Reihe 1893/1997

Station	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR	SO	WI
Potsdam	+0,6	-0,5	+2,0	+6,0	+2,9	-1,2	+8,8	**+10,2**	+1,6	**+4,2**	+1,1	+0,3	**+36,1**	**+26,6**	**+10,4**
Bamberg	+1,7	-0,9	+1,5	+4,5	+5,3	+0,7	**+11,5**	+6,0	+3,3	+2,4	+0,1	**+1,3**	**+37,4**	**+29,3**	+6,9
Hamburg	**+3,3**	**+3,0**	+2,4	+0,8	+1,5	+1,4	+10,4	**+9,4**	-2,0	**+2,8**	**+3,3**	**+2,3**	**+38,9**	+23,7	**+13,7**
Karlsruhe	+0,4	0,0	+2,2	+1,0	+0,9	-3,0	+7,5	+3,4	+0,7	+1,9	+1,5	+1,5	+18,1	+11,5	+5,8
München	+0,1	**-3,2**	+1,4	+2,2	+7,3	-1,3	+5,1	+5,5	+1,4	+2,7	-0,3	+0,3	+21,3	**+20,7**	-0,9

unterstrichene Werte: Irrtumswahrscheinlichkeit < 10 %
fett gedruckte Werte: Irrtumswahrscheinlichkeit < 5 %
So/Wi - hydrologische Halbjahre

Tabelle 2:
Monats-, Halbjahres- und Jahreswerte des linearen Trends der potentiellen Verdunstung (nach Turc/Ivanov in mm), Reihe 1891/1997

Die *Schneedeckendauer* (Zahl der Tage mit Schneedecke) hat, von Ausnahmen abgesehen, flächendeckend abgenommen. Besonders betroffen davon sind die tieferen Lagen (s. Tab. 3).

Dies gilt in gleicher Weise auch für die Zeitspanne ununterbrochen aufeinander folgender Schneedeckentage (Schneedeckenperiode). Alle diese Veränderungen bestätigen die Annahme, dass die Zahl "kernloser" Winter zugenommen hat, d. h., dass insgesamt die Schneedeckenzeit eine geringere Zahl von Schneeperioden aufweist und diese überwiegend von kürzerer Dauer sind. Wegen der großen Variabilität aller Schneedeckengrößen lässt sich die statistische Signifikanz der Veränderungen meist nicht nachweisen.

Anmerkung: Für die beschriebenen Ergebnisse der Trendanalyse gilt, dass ein beobachteter Trend grundsätzlich nur für den Zeitraum, für den er abgeleitet wurde ("diagnostisch"), gültig ist. Das heißt vor allem, dass eine "prognostische" Auslegung der gewonnenen Ergebnisse unzulässig ist.

Station	Höhe m ü. NN	Stand.-abw. SA	Mittelwert MW	absoluter Trend Tr	relativer Trend Tr / MW
Hamburg-Fuhls.	11	21,26	30,47	-18,96	-0,62
Schwerin	59	25,31	40,76	-25,49	-0,63
Potsdam	81	24,92	43,49	-9,81	0,23
Karlsruhe	112	17,44	21,69	-14,99	-0,69
Göttingen	167	23,62	37,00	-11,13	-0,30
Aachen	202	17,28	23,31	-7,21	-0,31
Görlitz	238	20,90	55,87	-12,25	-0,22
Öhringen	276	20,10	36,47	-11,31	-0,31
Chemnitz	418	19,95	62,67	-3,66	-0,06
Weißenburg/Bay.	422	21,05	46,42	-11,63	-0,25
Weiden/Opf.	438	21,63	62,47	-5,18	-0,08
Ellwangen/Jagst	443	25,00	56,31	-29,92	-0,53
Hof-Hohensaas	567	21,54	81,76	-5,96	-0,07
Ulm	567	24,44	57,29	2,07	0,04
Braunlage	607	24,27	110,67	10,75	0,10
Grebenhain-Herch.	608	24,52	84,80	1,07	0,01
Kleiner Feldberg/Ts.	805	25,55	98,69	-14,70	-0,15
Oberstdorf	810	21,19	127,18	-1,01	-0,01

Tabelle 3:
Langzeitverhalten des Schneedeckenregimes. Trendanalyse für die Schneedeckendauer (Anzahl der Tage mit Schneedecke pro Winterhalbjahr), Reihe 1951/52 bis 1995/96

Literatur

[1] Damrath, U., Doms, G., Frühwald, D., Heise, E., Richter, G., Steppeler, J.: Operational Quatitative Precipitation Forecasting at the German Weather Service. Journal of Hydrology, 239, 2000, S. 260-285

[2] Rachner, M.; Matthäus, H.; Schneider, G.: Projekt SNOW-D. Echtzeitvorhersage der Schneedeckenentwicklung und der Wasserabgabe aus der Schneedecke. Erste Ergebnisse. Dt. Gewässerkundliche Mitteilungen (41), H. 3, 1997, S. 1-10

[3] Reich, R. und G. Wiesner: Bereitstellung von langen Reihen interpolierter Gitterpunktwerte des Niederschlags (Tageswerte) mit Hilfe des Verfahrens BONIE.

DWD/GF Hydrometeorologie, Abschlussbericht Projekt KLIWA-Gitter N), Berlin, 2000, 23 S.

[4] Bartels, H., Malitz, G., Asmus, S., Albrecht, F.M., Dietzer, B., Günther, Th., Ertel, H.: KOSTRA - Starkniederschlagshöhen für Deutschland. DWD/GF Hydrometeorologie, Offenbach am Main, 1997, 29 S., 52 Karten

[5] Günther, Th., Rachner, M., Matthäus, H., Albrecht, F.M., Ertel, H.: Regionalisierte Extremwerte des Niederschlagsdargebots aus Regen und Schneeschmelze für Deutschland (REWANUS-Atlas). DWD/GF Hydrometeorologie, Berlin 2000, 18 S, 21 Karten

[6] Günther, Th. und H. Matthäus: Regionalisierte Extremwerte aus Regen und Schneeschmelze für Deutschland. KA-Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall, 2001 (48) Nr. 8, S. 1119-1126

[7] Schmidt, Th.: Maximierte Gebietsniederschlagshöhen für Deutschland. DVWK-Mitteilungen 29, Kommissionsvertrieb Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn, 1997, 128 S.

[8] Malitz, G.: Außerordentlich extreme Niederschlagshöhen in den Flussgebieten Deutschlands (NIEFLUD-Abschlussbericht).DWD/GF Hydrometeorologie, Berlin 2000, 31 S.

[9] Klämt, A.: Konzipierung eines Nutzer-orientierten Modells zur Berechnung aktueller Monatssummen der Gebietsverdunstung unter Berücksichtigung der Art der Landnutzung. Acta hydrophys., 32(1988) 4, 237-250

[10] DVWK-Merkblätter 238 (1996), Bonn: Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen.

[11] IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change; Third Assessment Report Part I: The Scientific Basis, Geneva, 2001

[12] Blümel, K., Klämt, A., Malitz, G., Matthäus, H., Rachner, M., Richter, D.: Hydrometeorologische Untersuchungen zum Problem der Klimaveränderungen (Projekt HUK). Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 219, Offenbach am Main, 2001, 371 S.

[13] Rapp, J. und C.-D. Schönwiese: Atlas der Niederschlags- und Temperaturtrends in Deutschland 1891-1997. Frankf. Geowiss. Arb., Serie B, Bd. 5, 2. Auflage, 1996

[14] Hydrologischer Atlas von Deutschland; 2. Lieferung, Kartentafel 2.14 "Klimatische Wasserbilanz". Herausgeber: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2002

Herbert Teichmann

Friedrich Wöhler als Berliner Lehrer und Forscher[1]

Bild 1:
Friedrich Wöhler (31.7.1800 - 23.9.1882) in jungen Jahren[2]

An Jahrestagen von weit über Berlin hinausreichender Bedeutung scheint auch im runden Jubiläumsjahr 2000 für die Wissenschaft kein Mangel zu herrschen. Jedenfalls begehen nach dem 300. Jahrestag der Akademie und dem 100. des Emil-Fischer-Instituts in der Hessischen Straße nicht nur die Chemiker auch noch den 200. Geburtstag Friedrich Wöhlers.

Wöhler prägte die Herausbildung der Chemie zu einer modernen Wissenschaft entscheidend mit, fast 6 Jahrzehnte lang. Der erste von ca. 300 Zeitschriftenbeiträgen – fast ausschließlich Experimentalarbeiten (und er

1. Nach einem Vortrag am 19.10.2000 vor der Klasse Naturwissenschaften der Leibniz-Sozietät
2. Abbildung aus Wilhelm Prandtl, Deutsche Chemiker in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts, Weinheim 1956, S. 142 (ohne Angabe von Künstler oder Herkunft). – So etwa wird man sich Wöhler in seiner Berliner Zeit vorzustellen haben; schlank, rank und jugendlich wirkte er aber auch später. Als er 1835 auf einer gemeinsam mit Gustav Magnus unternommenen England-Reise die Bekanntschaft Faradays machte, hielt dieser ihn für den „Sohn des bekannten Chemikers Wöhler“.

publizierte bei weitem nicht alles, was er machte) – erschien 1821, der letzte 1880. Ungewöhnlich breit ist sein Interessenbereich: anorganische, analytische, technische, organische, physiologische Chemie, Mineralien- und Meteoritenkunde. Als einer der Begründer der organischen Chemie wird sein Name gewöhnlich zusammen mit dem Liebigs genannt. Obwohl selbst philosophisch nicht engagiert, wirken Ergebnisse seiner Experimentierkunst tief in grundlegende weltanschauliche Fragestellungen hinein.

Enge Bande verknüpfen Wöhler mit Berlin und dessen AdW. Die Gesellschaft naturforschender Freunde zu Berlin ernennt ihn sogar zweimal zum Ehrenmitglied[1].

Nur gut 10% der unglaublich langen aktiven Zeitspanne macht sein Berliner Wirken aus, aber allein dies stellt eine beeindruckende würdigenswerte Leistung dar; so sah man es auch zu seinen Lebzeiten.

I. Vorberliner Zeit

Geboren am 31.7.1800 in Eschersheim (heute Ortsteil von Frankfurt am Main) als Sproß einer wohlsituierten Familie, erwarb Wöhler erste Schulkenntnisse durch heimischen Privatunterricht und bezog schließlich das Frankfurter Gymnasium[2]. Seine schulischen Leistungen waren unauffällig, in Mathematik eher mäßig. Zwei Leidenschaften beseelten ihn, als Schüler schon wie noch im hohen Alter: Experimentalchemie und das Sammeln von Mineralien. Letzteres Hobby brachte ihn mit dem vielgereisten Händler Menge zusammen, der den Gymnasiasten 1815 anläßlich der Frankfurter Messe mit dem Mineraliensammler Goethe bekannt machte.

---

1. Am 16.8.1825 und 22.12.1873; persönliche Mitteilung von Dr. Günter Beer, Direktor des Museums der Chemie e. V., Göttinger Chemische Gesellschaft, 11.10.1993.
2. Dem Lehrkörper dieser Bildungsanstalt gehörten herausragende Persönlichkeiten an wie der Historiker Friedrich Christoph Schlosser (1776-1861) und sein Nachfolger Carl Ritter (1779-1859; OM Preuß. AdW 21. 3.1822), der allerdings sehr bald einem Ruf nach Berlin folgte und hier als Geograph Triumphe feierte. Bereits vor Wöhlers Zeit wirkte der Keilschrift-Entzifferer Georg Friedrich Grotefend (1775-1853; KM Preuß. AdW 15.4.1847) am Frankfurter Gymnasium. – Für Schlossers Ausführungen auf dem Gymnasium war Wöhler nach eigenem Bekunden „noch nicht reif“. Später genießt er als Student dessen Vorlesungen in Heidelberg; nach Lektüre in Schlossers „Weltgeschichte“ konstatiert er 61jährig: „Welches göttliche Studium ist das der Geschichte, wenn man in das richtige Alter gekommen ist.“ A. W. Hofmann (Hrsg.), Aus Justus Liebig’s und Friedrich Wöhler’s Briefwechsel. Braunschweig 1888; W. an L., 6.2.1862.

Über die beeindruckenden Experimente des Primaners Wöhler sind wir durch seine Briefe an einen Mitstreiter authentisch unterrichtet[1]. Liebig bekam sie 1870 als Präsident der Bayerischen AdW in deren Archiv zu Gesicht und übersandte einen davon als Abschrift an Wöhler mit der Bemerkung: „In diesem einen Brief liegt Deine ganze Laufbahn als Chemiker klar aufgedeckt. Dein ganzes Denken dreht sich um Experimente …[2]. Und Wöhler antwortet: … Der Chloroperation erinnere ich mich noch ganz lebhaft, denn ich wäre beinahe daran erstickt. Um dieselbe Zeit operirte ich auch auf meiner Stube mit Phosphor und verbrannte mir dabei die linke Hand so arg, daß die Narben noch zu sehen sind. … All mein Denken und Dichten drehte sich damals um die Chemie. Mein Ideal war vor allem, Kalium zu machen nach Curaudau's Verfahren; meine Schwester zog dabei den Blasebalg, und die Waschküche worin dies geschah, wäre beinahe in Brand gerathen. Aber ich bekam wirklich Kalium und konnte vor Freude darüber in der Nacht nicht schlafen"[3].

Mit spärlichsten Mitteln[4] entfaltet er ungewöhliche Aktivitäten; insbesondere was spektakulär oder neu ist, packt er an. Er führt Elektrolysen mit selbstgebauten Voltasche Säulen (bekannt seit 1800) aus und stellt elementares Jod her (1813 entdeckt von Courtois). Als er in *Schweiggers Journal* 1817 von der Entdeckung dreier neuer Elemente liest, des Cadmiums durch Stromeyer (EM Preuß. AdW 1818), Selens durch Berzelius, (KM Preuß. AdW 1812, AM 1825) und Lithiums durch dessen Schüler Arfvedson, macht er sich umgehend an deren Gewinnung. Für die des letzteren reicht sein Spodumen-Vorrat nicht; die Selen-Darstellung wird Gegenstand seiner ersten wissenschaftlichen Publikation; mit dem Cadmium-Muster wandert er zu Stromeyer nach Göttingen zwecks Bestätigung der Authentizität.

1820 nimmt Wöhler in Marburg das Medizinstudium auf, wechselte aber wegen Mißhelligkeiten mit dem dortigen Chemie-Ordinarius Wurzer nach einem Jahr an die Universität Heidelberg; hier erlaubt ihm Leopold Gmelin (KM Preuß. AdW 1827) generös die Benutzung seines Laboratoriums. In diese Zeit fällt der Beginn der Cyan-Arbeiten, die seinen Ruf begründen und zu den Publikationen Nr. 2 – 4 führen (1821-23); dazu gehört die Entdeckung der Cyanate, sowohl durch Cyanid-Oxidation als auch durch alkalische Dicy-

1. G. W. A. Kahlbaum, Friedrich Wöhler. Ein Jugendbildnis in Briefen an Hermann v. Meyer. Leipzig 1900.
2. Briefwechsel, L. an W. 27.6.1870.
3. Ebenda, Wöhler an Liebig 30.6.1870.
4. So unterbricht er einen Brief: „Eben regnet es stark, ich muß mir destillirtes Wasser holen. Lache nur." Anm. (4), Wöhler an H. v. Meyer 10.8.1818.

an-Hydrolyse. Seine erste physiologisch-chemische Arbeit, der anhand von Selbstversuchen studierte „Übergang von Materien in den Harn“, trägt ihm nicht nur die 5. Veröffentlichung ein (in der Zeitschrift seines Lehrers Friedrich Tiedemann, KM Preuß. AdW 1812, AM 1854), sondern auch die für diese Preisaufgabe ausgelobte Goldmedaille. Durch die Auffindung einer neuen Abart des zeolithischen Harmotoms macht der Student Wöhler die später nicht unwichtige Bekanntschaft des berühmten Geologen Leopold von Buch.

Die Promotion zum Dr. med. 1824 bringt zugleich eine Abkehr vom Studienfach Medizin. Auf Gmelins Geheiß geht er nach Stockholm zu Berzelius (KM Preuß. AdW 1812, AM 1825), dessen Vorzugsschüler er wird und dem er lebenslang verbunden bleibt[1, 2]. Vor Wöhler hatten schon Christian Gottlob Gmelin (KM Preuß. AdW 1834) aus Tübingen sowie die Berliner Forscher Eilhard Mitscherlich, Heinrich Rose und dessen Bruder Gustav die exzellente praktische Ausbildung bei dem schwedischen Altmeister absolviert, später folgt ihm darin auch Gustav Magnus (s. dazu Abschn. VI).

Nach glaubwürdigen Angaben betrieb der Medizinstudent Wöhler seine hochkarätige Chemie ohne jedweden Besuch einer einschlägigen Fachvorlesung. In Stockholm ändert sich dies grundlegend; ungeachtet der anfänglichen Sprachbarriere schwärmt er von der Klarheit des Vortrags seines Lehrers am Karolinska Institut. Entscheidend aber ist für den jungen Adepten das tägliche Beisammensein mit Berzelius in dem höchst spartanisch, aber sehr zweckmäßig eingerichteten Labor, als dessen einziger Mitarbeiter. Eine qualifiziertere „Postdoc“-Ausbildung hätte sich schwerlich finden lassen.

Zusammen mit anorganisch-präparativen Arbeiten an Cer-, Lithium-, Selen- und Wolfram-Verbindungen bieten ihm hier vor allem diffizile und häufig zu wiederholende Mineralanalysen eine einzigartige experimentelle Schule. Daneben fährt er fort mit seiner Cyan-Chemie und entdeckt dabei das Dithiooxamid (den Rubeanwasserstoff) durch Einwirkung von Schwe-

1. Der vom Nobelpreisträger Otto Wallach sorgfältig edierte Briefwechsel beider ist ein beredtes Zeugnis dafür und zugleich eine einzigartige wissenschaftshistorische Fundgrube: O. Wallach (Hrsg.), Briefwechsel zwischen J. Berzelius und F. Wöhler, 2 Bde., Leipzig 1901.
2. Wie sehr Berzelius an seinem Schüler hing, bezeugen wiederholt Passagen aus dem Briefwechsel nach Wöhlers Heimreise: „… denke ich immer mit Bedauern daran, daß Wöhler nicht mehr da ist. …“ (B. an W., 12.10.1824); „… Ich sehne mich entsetzlich nach Herrn Doktor. …“ (B. an W., 19.11.1824). – „Berzelius“ wurde auch zum Cognomen Wöhlers in der Leopoldina (Mitglied 15.8.1858; Adjunkt 22.1.1873): C. v. Voit, Leopoldina 19 (Nr. 17-18, Sept. 1883), 149.

felwasserstoff auf Dicyan. Ungleich bedeutsamer noch ist die analoge Hydrolyse mit wässrigem Ammoniak, die ihn zur Oxalsäure führt. Vier Jahre vor seiner legendären Harnstoff-Synthese hat Wöhler somit auch die erste „vegetabilische“ Substanz aus rein anorganischen Verbindungen synthetisiert. Erstaunlicherweise bleibt das Echo darauf weitestgehend aus, obgleich doch auch hiervon das Vitalismus-Konzept mit seiner Ungleichsetzung der in den „drei Reichen der Natur“ (Mineral-, Pflanzen-, Tierreich) wirkenden Kräfte gravierend betroffen wird. Entschieden mehr Aufmerksamkeit findet dagegen seine (eher nur für Chemiker interessante) Analyse des Silbercyanats, worauf im Zusammenhang mit seinen Berliner Untersuchungen noch einzugehen ist.

Im Oktober 1824 wieder in Deutschland, beabsichtigt Wöhler, gemäß Gmelins Vorschlag sich in Heidelberg zu habilitieren. Inzwischen aber hat Berzelius bereits begonnen, seine Fäden zu ziehen und den Lieblingsschüler näher an sich heranzuholen. Er bedient sich dabei u. a. seiner ehemaligen Schüler Mitscherlich und Heinrich Rose in Berlin; aber auch Gustav Pasch aus Stockholm und ebenso Leopold v. Buch werden als Emissäre nach Frankfurt gesandt[1].

II. An der Städtischen Gewerbeschule Berlin

Was man Wöhler anträgt, liegt abseits jeder akademischen Karriere: eine Anstellung als Lehrer an der Berliner Städtischen Gewerbeschule, Vorläufer der lateinfreien Oberrealschulen. Sie war im September 1824 in einem von Nering[2] in der Kurstraße 52/53 als Residenz für Eberhard von Danckelman 1689/90 errichteten Gebäude eröffnet worden. Beim Sturz des Staatsministers unter dem Nachfolger des Großen Kurfürsten 1697 fiel auch dies Palais an den Staat und diente als Gästehaus für fürstliche Personen wie dem Prinzen Eugen oder dem Herzog von Marlborough. Fortan hieß es das Fürsten-

1. Näheres dazu s. H. Teichmann, Z. Chem. 23 (1983), 125-136.
2. Johann Arnold Nering (1659-1695) war wenige Jahre zuvor auch Baumeister des „Neuen Stalls“ gewesen, später u. a. für fast ein Vierteljahrhundert Sitz der Preußischen AdW.

haus, bis zum Abriß 1886[1]. Die Gewerbeschule mußte ihr Domizil hier u. a. mit dem Friedrich-Werderschen Gymnasium teilen. Erst 1826 zog sie um in die Niederwallstraße 12, wo einstmals Friedrichs d. Gr. Staatsminister Ewald von Hertzberg (EM Preuß. AdW 1752, Kurator 1786) residiert hatte[2].

Die Gründung der auf Erwerb naturwissenschaftlich-technisch-gewerblicher Kenntnisse ausgerichteten Schule folgte im wesentlichen den Ideen des Bürgermeisters Friedrich Wilhelm von Bärensprung. Dieser gedachte „mit Ingrimm“ seiner Latein- und Griechisch-Stunden auf dem Gymnasium zum Grauen Kloster und lernte erst an der Universität „den hohen Wert der Naturstudien kennen. … Am höchsten von allen Wissenschaften standen ihm Chemie und Technologie, demnächst Physik. Ihre allgemeine Kenntnis erschien ihm das dringendste Bedürfnis unserer Zeit“[3]. In Karl Friedrich Klöden fand er einen kompetenten Rektor von ähnlicher Gesinnung. Das Kuratorium, kollegiales Entscheidungsorgan der Schule, bestand aus Mitgliedern des Magistrats und der Stadtverordnetenversammlung mit Bärensprung an der Spitze. Klödens Bemerkung, „daß Berlin dem übrigen Deutschland mit der Errich-

1. Nicht allein Bücher, auch Bauten und Plätze haben ihre Schicksale. Mittlerweile in vielfältiger Nutzung als kommunales Eigentum, mußte das 200jährige Fürstenhaus in der Gründerzeit einem Geschäftshaus weichen und dieses ein halbes Jahrhundert später dem Erweiterungsbau der Reichsbank. Dessen Grundsteinlegung 1934 fand mit großem Pomp in Gegenwart der neuen Fürsten statt, an der Spitze Hitler mit Göring und Goebbels; als Arbeitsbeschaffungsmaßnahme und erstes Großbauprojekt des neuen Regimes erfuhr es entsprechende propagandistische Aufmerksamkeit. Nach dem Kriege zunächst Stadtkontor und Finanzministerium der DDR, wurde es 1959 bekanntlich Sitz des ZK der SED und weitere 40 Jahre später des Auswärtiges Amtes der Bundesrepublik Deutschland.
2. Auch dies rekonstruierte Gebäude, an der Stelle des 1738 abgebrochenen Alten Leipziger Tores gelegen und mit dem rückwärtigen Garten an den Festungsgraben grenzend, hatte bis Ostern 1829 noch andere Nutzer. Während parterre Unterrichtsveranstaltungen liefen, hielt eine seit 1807 ansässige „Ressource für Unterhaltung“ mit Restaurationsbetrieb im Obergeschoß bzw. in den Kellerräumen Singtees ab, veranstaltete Hochzeitsfeiern oder auf dem Hof Schweineschlachten. Der erboste Gründungsrektor Karl Friedrich Klöden schlug denn auch vor, über dem Haustor eine Tafel anzubringen mit der Inschrift: „Thaerbuschische Ressource nebst angehängter Gewerbeschule“ (statt dessen ehrte man Klöden 1924 mit einer Gedenktafel an der Fassade). Aus dem 1863/64 mit einer 2. Etage versehenen Haus zog die Anstalt, 1882 in Friedrich-Werdersche Oberrealschule umbenannt, zu Ostern 1924 um in die 1865-67 errichteten Gebäude des ehemaligen Sophiengymnasiums in der Weinmeisterstraße 15. Von diesen steht heute nur noch das backsteinerne Direktorenhaus mit dem antikisierenden Fries von Max Lohde.
3. K. F. v. Klöden, Jugenderinnerungen. 2., von K. Koetschau besorgte Ausg., Leipzig 1911, S. 490.

tung einer solchen Schule vorausging“[1], deutet die Einmaligkeit dieser fortschrittlichen Einrichtung an.

II.1 Lehrer für Chemie und Mineralogie

Seine Tätigkeit nimmt Wöhler im April 1825 auf, zunächst nur als Lehrer für Chemie und Mineralogie. Als einziger des Kollegiums kein ausgebildeter „Schulmann“, ist er in mehrfacher Hinsicht ein gänzlich untypischer Lehrer. Experimentalchemie seines Stils dürfte seinerzeit schwerlich an einer anderen Schule praktiziert worden sein. Im Briefwechsel mit Berzelius finden sich gelegentlich Angaben über Demonstrationsversuche wie die effektvolle Entzündung von Knallgas über Quecksilber mittels Platinschwamm oder die Verflüssigung von Schwefeldioxid, Chlor und Dicyan. Er weiß aber auch den rechten Ton gegenüber der Schulbürokratie zu treffen. Als ihm nach Ablauf des Probehalbjahrs ein Dreijahresvertrag vorgelegt wird, bringt er im Antwortschreiben an Bürgermeister Bärensprung unmißverständlich seine eigenen Forderungen vor: nicht 15, sondern nur 12 Wochenstunden Unterricht (da die Vorbereitung der Versuche mehr Zeit erfordert als der Unterricht selbst), davon nur 2 im Cöllnischen Gymnasium, freie Wohnung und 700 Taler Jahresgehalt. „… Meine letzte Bedingung endlich … wäre: jährliche Ferien von mindestens 4 Wochen. Ich wünsche diese nicht allein der Erholung wegen, sondern vorzüglich um diese Zeit zu wissenschaftlichen Reisen benutzen zu können. Die Natur dieser Wissenschaften und ihr jetziger Stand bringen es mit sich, daß sich Jeder, der sie betreibt, von Zeit zu Zeit umsehen muß, wenn er vorwärts schreiten, neue Thatsachen und Ideen sammeln und nicht zum bloßen Stubengelehrten herabsinken will, was gerade für diese Wissenschaften die unglücklichste Wendung von der Welt wäre. Ich stelle mir auch vor, daß es den Vorgesetzten einer Gewerbeschule angelegen seyn muß, daß derjenige, welcher … diese Wissenschaften in Bezug auf ihre Anwendung im Leben lehren soll, selbst genau mit allen technischen Vorgängen, mit Fabriken, Hüttenwesen etc. bekannt werde, und solche Erfahrungen kann er nur auf Reisen sammeln“[2].

1. K. F. Klöden, Programm zur Prüfung der Zöglinge der Gewerbeschule, Ostern 1826, S. 81. – Die seit 1825 alljährlich zu Ostern ausgegebenen Programme geben auch Auskunft über die Lehrgegenstände der einzelnen Fächer, also auch der Wöhlers.
2. Ehemaliges Stadtarchiv Breite Straße, Rep. 20, Nr. 1149, Bl. 5, Wöhler an Bärensprung 23.8.1825.

Zeit	Kl.	*Mo*	*Di*	*Mi*	*Do*	*Fr*	*Sa*
8 - 9	I	*Algebra*	Botanik	Französisch	Französisch	Algebra	Französisch
	II	***Chemie***	Französisch	Französisch	Französisch	***Chemie***	Französisch
9-10	I	Geometrie	Deutsch	Deutsch	Geometrie	Deutsch	Geometrie
	II	Schreiben	Deutsch	Deutsch	Schreiben	Deutsch	Deutsch
10-11	I	Botanik	Geographie	Physik	Botanik	Geographie	Physik
	II	Geographie	***Mineralogie***	***Mineralogie***	Geographie	Rechnen	***Mineralogie***
11-12	I	Zeichnen	Schreiben	***Arb. im Lab.***	Schreiben	Zeichnen	Religion
	II	Zeichnen	Schreiben	Religion	Geometrie	Zeichnen	Religion
2 - 3	I	Rechnen	Englisch		Rechnen	Englisch	
	II	Rechnen	Rechnen		Rechnen	Geometrie	
3 - 4	I	***Chemie***	***Chemie***		Physik	***Chemie***	
	II	Geometrie	Physik		***Chemie***	Physik	
4 - 5	I	*Arbeits-*	*Arbeits-*		*Arbeits-*	*Arbeits-*	
	II	stunde	stunde		stunde	stunde	

Bild 2:
Lektionsplan der Gewerbeschule 1825/26; Wöhlers Stunden markiert

Alle seine Bedingungen werden akzeptiert, der Lektionsplan des Winterhalbjahres (die Schule ist noch zweiklassig) weist exakt 10 Stunden für Wöhler aus, die beiden anderen gibt er im Cöllnischen Gymnasium. „Damit kann ich ganz gut hier leben“, kommentiert er gegenüber Berzelius, und betont insbesondere „den freien Gebrauch des Laboratoriums, für welches ich so ziemlich alles anschaffen kann, was ich will“[1], sowie die mietfreie Wohnung[2, 3].

Die Stunde Arbeiten im Laboratorio belegt, daß Wöhler entgegen anderslautenden Angaben bereits im Fürstenhaus ein Labor eingerichtet hatte, genau genommen noch vor Aufnahme seines Unterrichts. Ein Fundus für die Ausstattung war auch schon vorhanden, wie das Schulprogramm zu Ostern 1825 ausweist: Für den Unterricht in der Chemie besitzen wir bereits die meisten erforderlichen Instrumente, Geräthschaften, Reagenzien und außerdem erforderlichen chemischen Stoffe an Säuren, Salzen und Metallen, so

1. Briefwechsel, W. an B. 18.9.1825.
2. Bereits vor dem Umzug der Schule erhält Wöhler Ende 1825 eine kleine (später erweiterte) „Amtswohnung“ in der Niederwallstraße 12. – Nach Eintreffen in Berlin hatte er zuerst bei Mitscherlich gewohnt, dann eine Wohnung am Kupfergraben 4a gefunden (an der Stelle dieses Hauses liegt heute hier nur ein abgeräumtes Ruinengrundstück gegenüber dem Pergamon-Museum) und danach in der Friedrichstraße 164. – Die Forderung nach freier Wohnung resultierte aus den hohen Berliner Mietpreisen; Hegel hatte 1818 deshalb für die Annahme des Rufs nach Berlin die gleiche Bedingung gestellt.
3. „Das schönste ist …, daß ich aus meinem Schlafzimmer nur noch durch ein Zimmer zu gehen brauche, um in meinem Laboratorium zu seyn, welches ich freylich erst nach Neujahr einrichten kann“, berichtet er Berzelius (W. an B. 11.12.1825).

daß der Unterricht mit einer fortgehenden Reihe von Versuchen begleitet werden kann[1].

Ein Laboratorium war in diesem Hause übrigens schon einmal installiert worden, für Don Domenico Manuel Caëtano Conte de Ruggiero – so jedenfalls nannte sich ein 1705 hier einquartierter Gast. Er versprach, dem geldbedürftigen ersten Preußenkönig Gold zu machen und endete wegen Nichteinlösung des Versprechens nach mehreren Fluchtversuchen wie manch anderer seiner Zunft an einem mit Goldflittern behängten Galgen.

II.2 Schülerpraktika

Die Zusage eines eigenen Labors war zweifellos ausschlaggebend gewesen für Wöhlers Annahme der Lehrerstelle. In diesem führte er während der knappen Freizeit seine wissenschaftlichen Arbeiten durch („manchmal nur verstohlen“, wie er Berzelius schreibt), aber er leitete hier auch – in eigener Initiative und unentgeltlich – seine Schüler an unterrichtsfreien Nachmittagen zu eigenen praktischen Übungen an. Wir haben wieder sein eigenhändiges Zeugnis dafür in einem Schreiben an Bärensprung: „Seitdem ich Lehrer bei der Gewerbeschule bin, habe ich mir ein Vergnügen daraus gemacht, Schüler, die sich durch Fleiß, Fortschritte und Eifer in meinem Lehrgegenstande auszeichneten, unter meiner Aufsicht gewöhnlich 4 oft 6 Stunden lang wöchentlich im Laboratorium arbeiten zu lassen, ohne daß diese Zeit zu den mir vorgeschriebenen und honorirten Stunden gerechnet war. Diese Arbeiten der Schüler werden mir nun zur Pflicht gemacht und dafür 4 Stunden festgesetzt …, Arbeiten, zu denen … in der Regel der ganze Mittwoch- und Sonnabend-Nachmittag verwandt wird.“[2]

Mit gleichem Schreiben geht er auch auf die Vorstellungen des Schul-Curatoriums ein, noch vor Auslaufen des Dreijahresvertrages durch eine unbefristete Anstellung mit 800 Talern Jahresgehalt sich seiner auf Dauer zu versichern. Letzteres erscheint ihm ebenso unangemessen wie die Stundenzahl. Er wird deutlich: „es kann mir daher nicht verdacht werden, wenn ich unter solchen Verhältnissen einmal einem möglichen Rufe nach einer anderen Stelle … folgen sollte, zumal wenn es die Stelle an einer Universität beträfe“[3]. So kommt „in Berücksichtigung seiner ausgezeichneten Wissenschaftlichkeit und seiner anerkannten Verdienste“ eine Festanstellung per

1. K. F. Klöden, Programm zur Prüfung der Zöglinge der Gewerbeschule, Ostern 1825, S. 67.
2. Anm. (16), Bl. 41/42, Wöhler an das Schul-Curatorium 29.12.1827.
3. Ebenda.

1.1.1828 mit den geforderten 1000 Talern Gehalt und der Einbindung der Praktika- in die Unterrichtsstunden zustande. Sein Wochenplan umfaßt nun alles in allem 16 Stunden, bei denen es bis zu seinem Ausscheiden 1831 bleibt. Dafür übernimmt er neben anderen Verpflichtungen die Funktion eines Ordinarius der 2. Klasse.

Rektor Klöden vermerkt die feste Anstellung als „höchst erfreulichen Umstand“ und gibt im Schulprogramm 1829 eine bemerkenswerte Charakterisierung Wöhlers: „Von seinen Kenntnissen, seiner Geschicklichkeit und seinem schönen Eifer kann sich sowohl die Wissenschaft als die Schule reiche Früchte versprechen, und mit Freuden begrüße ich ihn als meinen Collegen und Mitarbeiter“. Die hohe Wertschätzung seiner Person drückt sich auch darin aus, daß Wöhler unter Einschaltung des Kultusministeriums 1828 durch den König zum Professor an der Gewerbeschule ernannt wird.

Verbunden mit der Umwandlung des interimistischen Anstellungsverhältnisses in ein festes ist der Erwerb des Bürgerrechts der Stadt Berlin und damit des Status eines preußischen Untertanen. Dazu hat er vor dem Magistratskollegium am 10.3.1829 einen Bürgereid abzulegen und dessen Text eigenhändig zu unterzeichnen: „Ich Friedrich Wöhler schwöre einen Eid zu Gott dem Allwissenden und Heiligen, daß, nachdem ich zum 2. ordentlichen Lehrer an der Gewerbeschule zu Berlin berufen und bestellt bin, ich sowohl in diesem als auch in jedem anderen Amte, zu welchem ich auch künftig berufen werden möchte, seiner Königlichen Majestät von Preußen, Friedrich Wilhelm III., meinem allergnädigsten Könige und Herrn, und dem Königl. Hause treu und gehorsam sein, das Wohl des Vaterlandes in meinem Wirkungskreise nach Kräften fördern, alle meine Amtspflichten nach den bestehenden und noch zu erlassenden Gesetzen und Anordnungen des Staats und der von ihm verordneten Obrigkeit gewissenhaft erfüllen, die mir anvertraute Jugend nicht nur wissenschaftlich zu bilden, sondern auch zu gottesfürchtigen guten und verständigen Menschen zu erziehen, mit Ernst und Eifer bemüht sein, auch selbst ein christliches und erbauliches Leben führen will, wie es einem rechtschaffenen Lehrer geziemt, alles so wahr mir Gott helfe durch Jesum Christum!“[1]

1. Anm. (16), Acta des Magistrats zu Berlin betr. die Anstellung der Lehrer bei der Gewerbeschule, Vol. I (1823-1830). Akte 13189, Bl. 103.

Zeit	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa
7 - 8		Mineralogie 2. Kl.				
8 - 9	Chemie 3. Kl.					
9 -10				Mineralogie 2. Kl.		Chemie 3. Kl.
10-11	Mineralogie 3. Kl.	Chemie 2. Kl.			Chemie 2. Kl.	
11-12			Chemie 1. Kl.			
2 - 3				Chemie 2. Kl.	Chemie 1. Kl.	Technolog. Exkursion 1. Kl.
3 - 4						
				Chemische Arbeiten im Laboratorio von 4 bis 6 oder 7		

Bild 3:
Lektionsplan Wöhlers, Sommerhalbjahr 1828

Da im Labor jetzt ständig mehr als 10 Schüler gleichzeitig arbeiten, wird sogar ein Praktikumsassistent eingestellt, der Apotheker Behrend von der Tierarzneischule[1]. Wöhler kann bald darauf dem Bürgermeister vermelden: „Die Arbeiten der Schüler im Laboratorium gehen jetzt ihren regelmäßigen Gang, jeden Donnerstag und u. Freytag von 4 Uhr meistens bis 7 Uhr. Ich glaube, daß dieselben für die jungen Leute von großem Nutzen sind …. Denn erstens wird ihnen die Sache dadurch bei weitem klarer, weil sie selbst die Erscheinungen entstehen machen und unter ihren Händen entstehen sehen, und zweitens lernen sie dadurch Etwas mit Geschick anfassen, lernen gleichzeitig ihre Hände und ihren Kopf gebrauchen u. verlieren dadurch die auffallende Unbehülflichkeit, die sich so oft bey den gescheidesten Leuten offenbart, sobald es auf practische Ausführung ankommt“[2].

Die Einführung der Schülerpraktika muß als Wöhlers größtes Verdienst um den schulischen Chemieunterricht gewertet werden. Dennoch ist dies heute bei Chemikern wie Pädagogen unbegreiflicherweise offenbar total in Vergessenheit geraten. Er geht aber sogar noch einen Schritt weiter und bezieht besonders geeignete Schüler in seine eigene Forschungen ein. Wie dem

1. In Vertretung des Apothekers springt als Aufsichtführender im Praktikum auch der Deutschlehrer ein, der bekannte Dr. Philipp Wackernagel.
2. Anm. (16), Bl. 52/53, Wöhler an das Schul-Curatorium 7.5.1828.

Briefwechsel mit Berzelius zu entnehmen ist, sucht er z. B mit ihnen gemeinsam die günstigste Methode zur Isolierung des Alizarin-Farbstoffs aus der Krapp-Pflanze (was eben erst 1826 durch Robiquet erfolgt war) und läßt sich von ihnen auch Titandioxid oder sogar Pikrinsäure bereiten, so wie heute Hochschulassistenten sich von ihren Studenten Präparate darstellen lassen.

Im Schulprogramm Ostern 1828 schreibt Rektor Klöden dazu: „Die Schüler der oberen beiden Klassen, welche an der Chemie theils aus eigener Liebe zu dem Gegenstande, theils ihres künftigen Berufes wegen, ein besonderes Interesse nehmen, erhalten Gelegenheit, sich im praktischen Arbeiten im Laboratorium unter Anleitung des Herrn Dr. Wöhler zu üben. Die vorzüglich gelungenen Präparate derselben werden aufbewahrt, und bereits besitzt die Anstalt eine schöne Sammlung derselben, welche rühmlich für den Fleiß der Schüler spricht. Allmählig werden auf diese Weise sämmtliche chemischen Verbindungen durchgenommen und dargestellt“[1].

Zum 100. Jubiläum der Schule heißt es resümierend über Wöhler: „Er illustrierte seinen Vortrag durch eine große Anzahl von Experimenten … Im Schülerlaboratorium ließ er vor allen Dingen Präparate herstellen und Versuche ausführen, deren Durchführung im Unterricht zu zeitraubend gewesen wäre, und vielfach hat er die Schüler auch zu Hilfsarbeiten und Herstellung von Präparaten und Zwischenprodukten für seine wissenschaftlichen Arbeiten herangezogen. Er gab ihnen Einblick in die Art, wie wissenschaftlich gearbeitet und geforscht wird“[2].

II.3 Technologie, Exkursionen

Das Unterrichtsfach „Technologie“ findet sich erstmalig 1829 auf Wöhlers Stundenliste. Es handelt sich dabei um chemische Technologie, die zusammen mit der mechanischen (vertreten durch Klöden selbst) im gleichen Jahr aus dem Fach Technologie durch Teilung hervorging. Der Lehrstoff ist wiederum dem Gewerbeschul-Programm zu entnehmen; 1830 liest man: „Gewinnung und Benutzung des verschiedenen Brennmaterials, Holzverkohlung, Gewinnung und Anwendung des Holzessigs, Gasbeleuchtung [die erst 1826 in Berlin eingeführt worden war; d. A.], Gewinnung von Pottasche, Salpeter, Fabrikation des Schießpulvers; Gewinnung des Kochsalzes, Alauns, des Sal-

1. K. F. Klöden, Programm zur Prüfung der Zöglinge der Gewerbeschule, Ostern 1828, S. 100.
2. Anm. (16), Akte 192, Denkschrift Ein Jahrhundert Friedrich-Werdersche Oberrealschule, S. 59.

peters, Berliner Blaus, Beinschwarz; Gewinnung des Schwefel, Fabrikation der Schwefelsäure und anderen Säuren; Fabrikation der Ziegel, der Töpferwaren, der Fayence, des Porzellans, des Glases etc.“, und ein Jahr später: „Die Eisenhüttenkunde, alle dahin gehörigen Gegenstände umfassend, die Zuckerfabrikation, Stärkefabrikation, Bäckerei, Seifensiederei und Lichtfabrikation, die Ölfabrikation, Theergewinnung, Gerberei, Lederbereitung, die Branntweinbrennerei und übrigen Destillationen, die Weinbereitung, die Bier- u. Essigbrauerei etc. mit Excursionen in die vorzüglichsten hierzu geeigneten Werkstätten“.

Der jährliche Wechsel zwischen anorganisch- und organisch-chemischer Technologie macht von der Konzeption her insofern Sinn, als Technologie nur in der obersten Klasse gelehrt wird und diese abweichend vom uns geläufigen Turnus in der Gewerbeschule einem zweijährigen Kurs folgt. Praktisch aber kommt nur ein Teil der Schüler in den Genuß der gesamten Technologie, da sich erweist, daß eine beträchtliche Anzahl Absolventen die Anstalt bereits nach einjährigem Besuch der 1. Klasse verläßt.

Technologische Exkursionen für die 1. Klasse sind bereits in Wöhlers Lektionsplan vom Sommerhalbjahr 1828 vermerkt. Verblüffend ist die durch die allwöchentliche Frequenz ausgedrückte Intensität, ein Zeichen der angestrebten hohen Praxisorientierung.

III. Öffentliche Vorlesungen

Noch weniger als über diese schulischen Aktivitäten Wöhlers ist heute selbst in Fachkreisen über ein spannendes Kapitel Wöhlerscher Öffentlichkeitsarbeit bekannt. Mit diesen öffentlichen Vorlesungen reiht er sich ein in eine alte Berliner Tradition, die bis auf die Zeit weit vor der Universitätsgründung zurückgeht.

Mitte Oktober 1825, er ist gerade ein halbes Jahr hier, läßt Wöhler 300 Exemplare einer Druckschrift folgenden Inhalts verbreiten: „Das Curatorium der Gewerbeschule hat gewünscht, daß ich Vorlesungen über die Chemie für diejenigen halte, welche sich mit dieser Hülfs-Wissenschaft der Gewerbe näher bekannt zu machen wünschen. Ich werde daher in den Abendstunden von 7 bis 8 Uhr zweimal wöchentlich, nämlich Mittwochs und Sonnabends, in dem Hörsaale der Gewerbeschule (Kurstraße Nr. 52 eine Treppe hoch) solche Vorlesungen mit den erläuternden Experimenten halten, und ungefähr nach folgendem Plane: I. Kurze Auseinandersetzung allgemeiner Begriffe. II. Beschreibung derjenigen einfachen Stoffe, welche nicht Metalle sind, wie Schwefel, Sauerstoff, Wasserstoff etc., ihre wichtigsten Verbindungen unter

sich, und ihre technische Anwendung. III. Die atmosphärische Luft, Zusammensetzung, Druck und Temperatur derselben. Barometer, Thermometer etc. IV Die Alkalien und Erdarten mit den in technischer Hinsicht merkwürdigsten Verbindungen. V. Die Säuren. VI. Die vorzüglichsten Salze. VII. Die Metalle. VIII. Die wichtigsten Gegenstände aus der Pflanzen- und Thier-Chemie, wie Gährung, Alkohol, Aether, Seifenbildung, Farbstoffe etc.
Dr. Wöhler."[1, 2]

An Berzelius schreibt der Fünfundzwanzigjährige, „…daß es mir mit der Zeit etwas knapp ging, indem ich zu meinen Übersetzungs- und Drucksorgen … und zu meinen 11 Lectionen wöchentlich noch 2 dazu bekommen habe, für welche ich mich in jeder Hinsicht etwas zusammen zu nehmen habe, da ich sie vor einem ungefähr 90 Mann starken Publicum halten muß, welches hauptsächlich aus verständigen, alten Philistern, vorzüglich Fabrikanten und Dilettanten aller Art besteht…"[3]. Die noch erhaltene Hörerliste zählt exakt 90 Hörer auf, darunter Bürgermeister v. Bärensprung und einen Gutsbesitzer v. Treskow, die Stadträte Cantian und Keibel und den Kaufmann Niquet (dessen nach ihm benannter Wurstkeller nur wenige Schritte entfernt liegt), aber vorzugsweise Berufe wie Färbergehilfe, Seifensieder, Tuchfabrikant, Destillateur, Brauer, Essigbrauer.

Die Fortsetzung findet im Winter des folgenden Jahres statt, nunmehr mit Schwerpunkt Organische Chemie, „unter besonderer Berücksichtigung der dahin gehörenden technischen Theile". Auch organisatorisch hat sich einiges geändert: Vorlesungsabende sind nunmehr der Montag und Donnerstag, Ort ist jetzt schon das neue Schullokal Niederwallstraße 12, die Gebühr wird angehoben auf $3^1/_3$ Taler; dafür gibt es eine „Einlaß-Charte". Unter den Hörern findet sich diesmal der spätere Kunsthistoriker Franz Kugler, der erst in Vorjahr nach Berlin berufene Sternwarten-Direktor Johann Franz Encke (OM Preuß. AdW 1823) und der Stadtrat Abraham Mendelssohn Bartholdy, Vater des Komponisten (Felix' Bruder Paul schickte er übrigens auf die Gewerbeschule).

1. Anm. (16), Rep. 20, Nr. 10012.
2. In einer kurzen Anmerkung dazu macht das Curatorium Angaben über Zeit (2.11.1825 bis ca. Ende März 1826) und Teilnahmegebühren (3 Taler nebst 8 Sgr. für kleine Nebenausgaben). – Auch die Berliner Tagespresse informiert Ende Oktober über die Vorlesung. „Das Interesse, welches das Publikum an den Vorlesungen des Herrn Dr. Wöhler über Chemie nimmt", wird ebenfalls registriert: Berlinische Nachrichten von Staats- und gelehrten Sachen, 23.12.1825.
3. Briefwechsel, W. an B., 11.12.1825.

Diese Vorlesungen wachsen sich bald zu einer beträchtlichen Belastung aus. 1827/28 (im gleichen Winter hält auch Humboldt seine berühmten Kosmos-Vorlesungen) hat Wöhler ein Auditorium vorzugsweise aus Apothekern, und da sich diese in der Dienstbereitschaft abwechseln müssen, hält er 2 Parallelkurse. Für den Dezember 1827 z. B. findet man dann Vorlesungstermine wie sonnabends 20-21, sonntags 11-12 Uhr und sogar Heiligabend und Silvester 16-17 Uhr[1] – Einblicke aus unserer selbstgefälligen Leistungs- und Informationsgesellschaft, die Zweifel aufkommen lassen am Klischee von der biedermeierlichen Gemütlichkeit.

Es war keineswegs Wöhlers Art, vor einem großen Auditorium brillieren zu wollen. Die Initiative ging hier eindeutig vom Schul-Curatorium aus, wie er ja schon in seiner Vorlesungsankündigung 1825 vermerkt und wie es auch der Anstellungsvertrag beinhaltet. Erst in seinem letzten Berliner Winter 1830/31 kommt er von dieser Bürde frei, indem er – offenbar mit Bezug auf die Revolutionen in Paris, Belgien und Polen – darauf verweist, „daß in diesen gährenden, ungewissen und schlechten Zeiten im Publicum auch eine sehr geringe Disposition zur Chemie vorhanden seyn muß“[2].

IV. Übersetzer und Publizist

Gleich in seinem erstem Brief aus Berlin teilt Wöhler Berzelius mit, daß er von Heinrich Rose die Übersetzung des schwedischen Manuskripts seines Lehrbuchs übernommen habe[3]. Es ist die 2. Auflage des großen Lehrbuchs von Berzelius, das deutsch in 4 Bänden 1833-35 erscheinen wird. Diese allein ebenso wie die nachfolgende 4. (1835-41) und 5. Auflage (1843-48) bürdet dem nebenberuflichen Übersetzer ein immenses Arbeitspensum auf. Aber das ist bei weitem nicht alles an freiwillig übernommener Schreibtischtätigkeit. Bereits zu Weihnachten 1824 ersucht er aus Frankfurt bei Berzelius um dessen Zustimmung, die regelmäßig erscheinenden Jahresberichte übersetzen zu dürfen; Ch. J. Gmelin hatte dies in Tübingen für die ersten 3 Bände getan und war froh, nun einen Nachfolger gefunden zu haben. Wöhler übernahm dies mit der ihm eigenen Sorgfalt für die restlichen 24 Bände bis zu Berzelius' Tod. Ständig kamen ihm so Manuskript- und Korrekturfahnen-Pakete ins Haus. Die nicht immer erfreulichen Verhandlungen mit Verlegern, die Finanzfragen, die Anfertigung der Kupfertafeln, der Kampf gegen dreiste

1. Anm. (16), Rep. 20, Nr. 10012.
2. Anm. (27), Wöhler an Bärensprung 30.10.1830.
3. Briefwechsel, W. an B. 31.3.1825.

Raubdrucke oblagen ihm gleichermaßen. Doch am meisten setzte ihm wohl die eigene Gewissenhaftigkeit zu. In Zweifelsfällen begnügte er sich nicht immer nur mit dem Nachschlagen im Original, sondern prüfte Angaben eigenhändig experimentell im Labor nach. So gelangten auch anderweitig nirgends publizierte eigene Arbeitsergebnisse in die Berzelius-Übersetzungen.

Liebig schilt ihn deswegen: „Schon längst hat es mir weh gethan, daß Du Deine Zeit an Arbeiten verschwendest, die Deiner nicht würdig sind; auch Deine Freunde in Berlin begreifen nicht, wie Du mit einer solchen Überladung mit Arbeiten nur athmen kannst. …Wirf die Schreiberei zum Teufel und gehe in das Laboratorium, wo Du hingehörst“[1]. Und einen Monat später: „Wärest Du Deine verdammten Übersetzungen los, wir könnten gemeinschaftlich Riesenarbeiten vollbringen“[2]. Immerhin verschafft sich Wöhler so aber ein beinahe enzyklopädisches Fachwissen, das ihm bei der eigenen Laborarbeit zugute kommt[3]. Auch dem Ansehen kann die Herausgabe der Werke seines berühmten Lehrers nur dienlich sein. So heißt er bei Klöden schon 1830 „…der durch ausgezeichnete Leistungen in der Chemie so wie das glückliche Übersetzen mehrerer Schriften von Berzelius rühmlichst bekannte Wöhler“[4].

Die Übersetzertätigkeit beschränkt sich nicht auf Berzelius und die Chemie, auch die „Mineralogische Geographie von Schweden“ von Wilhelm Hisinger (KM Preuß. AdW 1827) überträgt er ins Deutsche, ebenfalls vom Beginn seiner Berliner Zeit an. So verwundert es nicht, daß Wöhler für eigene literarische Unternehmungen keine Zeit findet. Sehr früh schon sucht Bürgermeister Bärensprung ihn zu überzeugen, daß seine Schüler für den Chemieunterricht ein Kompendium aus seiner Feder bräuchten; aber erst Mitte 1831, kurz vor seiner Abreise, erscheint der „Grundriß der unorganischen Chemie“, der zahlreiche Auflagen erlebt und in eine Reihe fremder Sprachen übersetzt wird. Ein organisches Pendant publiziert er erst Jahre später.

---

1. Briefwechsel, L. an W. 19. 10. 1830. – Fast die gleiche Formulierung benutzt Liebig zwei Monate zuvor, als beide noch nicht auf „Du“ standen.
2. Briefwechsel, L. an W. 18.11.1830.
3. Motivationen materieller Art spielen aber schon eine Rolle: „…Du bedenkst nicht, daß Berlin nicht Gießen ist, und daß, was bei Euch 6 Batzen kostet, hier einen Thaler macht … Übrigens habe ich die Übersetzung … zu einer Zeit übernommen, wo ich noch viel Zeit übrig und noch recht wenig Einnahmen hatte“: Briefwechsel, W. an L., 17.11.1830.
4. K. F. Klöden, Programm zur Prüfung der Zöglinge der Gewerbeschule, Ostern 1830, S. 102.

V. Chemische Arbeiten in Berlin

Vor dem Hintergrund dieser enormen Belastungen, von denen Liebigs harsche Kritik nur die Übersetzertätigkeit anspricht, muß man Wöhlers Berliner Beiträge zur Chemie sehen. In dem fast chronikartig geführten Briefwechsel mit Berzelius haben wir eine beinahe akribische Dokumentation dieser Arbeiten, die auch Nichtpubliziertes erwähnt. Auf diese und die Korrespondenz mit Liebig sowie die ca. 2 Dutzend Veröffentlichungen in „Poggendorffs Annalen“ kann hier nur anhand einiger ausgewählter Beispiele zurückgegriffen werden.

Anfang März 1825 in Berlin eingetroffen, meldet Wöhler bereits im zweiten Brief nach Stockholm am 23.4. sein Labor als fertig eingerichtet. Mit seinem Schuldirektor Klöden, einem Amateur-Mineralogen, hat er schon Mineralien aus Geschieben des Berliner Raums untersucht.

Mitte Mai beginnt er mit der ersten seiner historisch gewordenen Berliner Untersuchungen, die bereits im Juli abgeschlossen und noch im gleichen Jahr publiziert wird[1], der Analyse von Bleimineralien unterschiedlicher Provenienz. In diesen sog. Grün-, Braun- und Weißbleierzen entdeckt er den zuvor nicht erkannten beträchtlichen Chlorgehalt, vermutet sogleich eine Art Doppelsalz und findet dies in allen Fällen bestätigt. Manche der Mineralien enthalten Arsenat statt Phosphat, manche beides vergesellschaftet. Für die naheliegende Vermutung einer Anregung durch Mitscherlich (der ja am Beispiel der Phosphate und Arsenate die Isomorphie entdeckt hatte) gibt es keinen Hinweis.

$$PbCh^2 + 3\ \ddot{Pb}^3\ \dddot{P}^2 \equiv PbCl_2 + 3\left[(PbO)_3\,(P_2O_5)\right]$$
$$= PbCl_2 + 3\ Pb_3(PO_4)_2 = Pb_5(PO_4)_3Cl$$

Wöhler 1825	$Pb_5(PO_4)_3Cl$	Pyromorphit
	$Pb_5(AsO_4)_3Cl$	Mimetisit
G. Rose 1827	$Ca_5(PO_4)_3Cl$	Apatit
Wöhler 1831	$Pb_5(VO_4)_3Cl$	Vanadinit

Bild 4:
Von Wöhler analytisch abgesicherte Bleierze, strukturanalog mit Apatit

1. F. Wöhler, Ann. Phys. Chem. 4 (1825), 161-172.

Wöhler stellt eine allgemeine Formel in der von Berzelius eingeführten Schreibweise auf: Indizierung hochgestellt, Chlor als Ch und die Bindung an zweiwertigen Sauerstoff durch 2 Punkte symbolisiert. In heutige Schreibung übersetzt gibt das dann als Kurzfassung letztlich die Formel am Ende von Zeile 2 in Bild 4. Auch bei Unkenntnis der Mineralien selbst sieht der Chemiker sofort, daß die Summenformeln des Pyromorphit und Mimetisit der des Apatit analog sind. Dies wichtige Phosphormineral wurde in seiner Zusammensetzung aber erst 2 Jahre später erkannt, durch Gustav Rose, gewissermaßen in Wöhlers Nachbarschaft. Einen weiteren Vertreter dieses Typs, mit Vanadat anstelle von Phosphat oder Arsenat, fand Wöhler 1831 in einem von Humboldt aus Mexiko mitgebrachten Braunbleierz[1].

Ebenfalls in seinem ersten Berliner Jahr beginnt er die Untersuchung des Honigsteins, eines Aluminiumsalzes der Mellithsäure (Benzolhexacarbonsäure) aus Braunkohleformationen, und ermittelt die richtige Summenformel; daß ihr die dreifache Molmasse zukommt, konnte erst vier Jahrzehnte später nach Kenntnis der Benzol-Struktur erkannt werden. Diese Berliner Arbeiten nimmt er später in Göttingen wieder auf, von wo die Mellithsäure-Thematik über Greifswald nach Berlin zurück transportiert wird zu A. Baeyer (1835-1917; KM Preuß. AdW 1884, AM 1905), dem schließlich 1866 die endgültige Strukturaufklärung gelingt[2].

Auch das folgende Berliner Jahr bringt eine Vielfalt bedeutender Arbeiten. Wöhler liefert eine komplette Analyse des seltenen Minerals Pyrochlor[3], findet u. a. den noch heute gebräuchlichen sauren Aufschluß des Titandioxids („mit Bisulphat von Kali“)[4] und identifiziert eine vermeintliche jodige Säure als Interhalogen aus Chlor und Jod[5]. Folgenreicher ist die Untersuchung der von H. Ch. Oersted (KM Preuß. AdW 1820) gefundenen reduktiven Chlorie-

1. Die bereits Ende 1828 begonnene und ganz ungewöhnliche Resultate zeitigende Untersuchung dieses Minerals muß er wegen Erkrankung abbrechen; sie bleibt liegen, wie andere Arbeiten auch, und Sefström bei Berzelius kommt ihm zuvor mit der Entdeckung des neuen Metalles Vanadium in einem schwedischen Stabeisen. Ihm bleibt nur das Recht zur Namensgebung für Humboldts Mineral und der Trost von Berzelius (mit Bezug auf Wöhlers letzte Cyansäure-Arbeit): „Man kann 10 unbekannte Metalle entdeckt haben, ohne daß soviel Genie dazu erforderlich wäre wie zu dieser schönen Abhandlung“: Briefwechsel, B. an W., 22.1.1831.
2. H. Teichmann, Klaproth und die Mellithsäure. Begründung einer Traditionslinie Berliner Forschung; in: Michael Engel (Hrsg.), Von der Phlogistik zur modernen Chemie, Berlin 1994, S. 49-79.
3. F. Wöhler, Ann. Phys. Chem. 7 (1826), 417-28.
4. Briefwechsel, W. an B. 14.3.1826.
5. F. Wöhler, Ann. Phys. Chem. 8 (1826), 95-98.

rung von Metalloxiden mit Kohle und Chlorgas. Diese 1825 an zwei Beispielen beschriebene Methode erkennt er sogleich als „höchst ingeniös“, wendet sie an auf die Darstellung der wasserfreien Chloride des Bor, Aluminium, Titan, Tantal und beobachtet sogar die Phosgen-Bildung dabei[1]. 1827 vergewissert er sich persönlich bei Oerstedt in Kopenhagen, „daß er nicht vorhabe, die Versuche mit dem Chloraluminium fortzusetzen“ (bei welchen dieser mittels Kalium-Amalgam ein unreines Aluminium erhalten hatte). Daraufhin stellt er erstmals reines und umfassend charakterisiertes metallisches Aluminium her, durch Reduktion des wasserfreien Chlorids mit Kalium-Metall[2]. „Ich gedenke, wenn ich mir die Zeit abstehlen kann, ähnliche Versuche mit Beryllerde, Yttererde … anzustellen“, schreibt er Berzelius[3]; im nächsten Jahr ist es dann so weit und er isoliert analog elementares Beryllium sowie (nicht ganz rein) das Selterdmetall Yttrium[4]. Die Aluminium-Herstellung rechnet man ihm später nächst der Harnstoff-Synthese zu seinen Berliner „highlights“.

1829 wird sein Laboratorium erweitert und mit Öfen eigener Konstruktion versehen. Er erfüllt sich einen alten Traum und kann jetzt enorm hohe Temperaturen erzeugen, was er sogleich zur thermischen Gewinnung von elementarem Phosphor nutzt. Dabei ersetzt er die für den Phosphat-Aufschluß zuvor übliche Schwefel- vollständig durch Kieselsäure (Sand), wie dies dann später auch bei der industriellen elektrothermischen Darstellung geschieht. Die Notiz darüber ist von spartanischer Kürze, aber der entscheidende Gedanke findet prophetisch Erwähnung: „Vielleicht kann diese Methode bei Gewinnung des Phosphors im Großen Anwendung finden. Das Material dazu kostet fast nichts …“[5]. Technischen Fragestellungen gegenüber ist Wöhler stets aufgeschlossen; auch die Acetylen-Gewinnung aus Calciumcarbid basiert auf einer von ihm 1862 beschriebenen Reaktion; Aluminium wird technisch jahrzehntelang nach seinem Verfahren und dem seines Schülers Henri Sainte-Claire Deville (KM Preuß. AdW 1863) erzeugt (mit Natrium statt Kalium); seine 1826 gefundene Neusilber-Bereitung direkt aus Nikkelsulfid wertet er zu Kasseler Zeiten unternehmerisch aus.

Das ihn seit den Studententagen faszinierende Gebiet der Cyan-Verbindungen findet auch in Berlin seine logische Fortsetzung. Zunächst wiederholt

1. Briefwechsel, W. an B. 22.10.1826.
2. Ebenda, W. an B. 10.10.1827, 3.11.1827; F. Wöhler, Ann. Phys. Chem.11 (1827), 146-161.
3. Briefwechsel, W. an B. 3.11.1827.
4. F. Wöhler, Ann. Phys. Chem. 13 (1828), 577-82.
5. F. Wöhler, ebenda 17 (1829) 178-69.

er 1825 die bereits in Stockholm vorgenommene Elementaranalyse des Silbercyanats. Grund ist, daß Liebig für sein Silberfulminat eine identische elementare Zusammensetzung gefunden hatte, was nach gängigen Vorstellungen nicht sein konnte. Liebig wiederholte deshalb Wöhlers Cyanat-Analyse, fand dabei fälschlich 6% Silber weniger und trug dies ausgerechnet in Wöhlers Heimatstadt Frankfurt auf der 4. Naturforscher-Versammlung 1825 vor („Neue Analyse von Wöhlers Cyansäure"). Wöhler seinerseits beweist nun, daß nicht er, sondern Liebig einen „6procentigen chemischen Bock" geschossen hatte, wie er sich ausdrückt[1]; später räumte Liebig selbst ein, die inkriminierte Analyse von 1825 „zu oberflächlich und zu hastig angestellt" zu haben[2]. Von nun an muß man sich daran gewöhnen, daß gänzlich verschiedene Substanzen die gleiche summarische Zusammensetzung haben können, ein Phänomen, das Berzelius wenig später Isomerie nennt.

1828 wird dann bekannt als das Jahr der Harnstoffsynthese. Sie ergibt sich folgerichtig nach Durchblättern seiner Stockholmer Aufzeichnungen. Dabei fällt ihm jetzt auf, daß bei der ammoniakalischen Hydrolyse des Dicyans neben der Oxalsäure (als dem Produkt der konkurrierenden Verseifung) zwar stets Cyanid, niemals aber zugleich Cyanat entstanden war wie bei der 1822 in Heidelberg entdeckten wässrig-alkalischen Hydrolyse. Statt des letzteren trat vielmehr stets eine weiße, kristalline, nicht salzartige Substanz auf (in Gleichung Zeile 3 von Bild 5 durch ein Fragezeichen markiert). „… ich hielt es für möglich, daß durch die Vereinigung von Cyansäure mit Ammoniak die Elemente zwar in derselben Proportion, aber auf eine andere Art zusammentreten"[3]. Dies prüft er nun z. B. durch Reaktion von Silbercyanat mit Salmiak oder Bleicyanat mit Ammoniakwasser und erhält die gleichen alkohollöslichen Kristalle. „Nun war ich au fait, und es bedurfte nur weiter Nichts als einer vergleichenden Untersuchung mit Pisse-Harnstoff, den ich in jeder Hinsicht selbst gemacht hatte …"[4, 5]. Damit ist einerseits klar, daß er den künstlichen Harnstoff schon 1824 bei Berzelius in Händen hatte, und daß er zum anderen – was in der endlosen sich anschließende Vitalismus-Diskussion untergeht – mit ein und der gleichen Reaktion erstmals sowohl einen „animali-

1. Briefwechsel, W. an B.11.12.1825.
2. Briefwechsel, L. an W. 13.1.1829.
3. Briefwechsel, W. an B. 22.2.1828.
4. Ebenda..
5. F. Wöhler, Ann. Phys. Chem. 12 (1828), 243-46. Unter „flüssigem Ammoniak" hat man hier nicht das verflüssigte Gas, sondern die wässrige Lösung zu verstehen.

schen“ als auch einen „vegetabilischen“ Körper aus „mineralischen“ Stoffen erzeugt hatte (Bild 5, Gleichg. 3 u. 4).

In den nächsten beiden Jahren weist Wöhler die Reversibilität der Harnstoffbildung aus Ammoniumcyanat nach; die bei der Harnstoff-Pyrolyse auftretende freie Cyansäure polymerisiert aber sofort zur trimeren Cyanursäure und zu einem weiteren, Cyamelid genannten Polymeren. Cyanursäure erhält er auch bei der Harnsäure-Pyrolyse[1].

Auf zweierlei richtet sich Wöhlers Interesse an der Harnstoff-Bildung. Einmal geht es ihm um die Frage, ob andere stickstoffhaltige Naturstoffe wie Alkaloide („vegetabilische Salzbasen“) ähnlich entstehen können; so versucht er z. B. – vergeblich – , Cinchonin mit Cyansäure umzusetzen. Zum andern betrifft es das Phänomen der gleichen Bruttozusammensetzung, das vorher schon zwischen Cyan- und Knallsäure aufgetreten war und sich bald darauf wieder im Verhältnis von diesen zur Cyanursäure und dem Cyamelid zeigt[2].

Wöhler weist zwar explizit darauf hin, daß es sich bei der Harnstoff-Synthese um die Bildung „eines organischen, und zwar sogenannten animalischen, Stoffes aus unorganischen“ handelt. Er geht aber nicht näher auf die Vitalismus-Problematik ein und bemerkt lediglich in seinem Bericht an Berzelius: „ein Naturphilosoph würde sagen, daß sowohl aus der thierischen Kohle, als auch aus den daraus gebildeten Cyanverbindungen, das Organische noch nicht verschwunden, und daher immer noch ein organischer Körper daraus wieder hervorzubringen ist“[3]. Allein schon aus dieser Formulierung geht die Distanz zu solcherart Interpreten deutlich genug hervor und es erscheint abwegig, Wöhler einen Vertreter des Vitalismus zu nennen. Ebenso ist aber auch die These nicht haltbar, sein künstlicher Harnstoff habe die Lehre von einer vis vitalis schnell zum Verstummen gebracht. Dennoch erfuhr nicht nur die Synthesereaktion selbst weltweite Würdigung, sondern es entstand eine kaum überschaubare darauf und auf ihre Interpretation bezogene Literaturfülle.

---

1. J. Liebig u. F. Wöhler, Ann. Phys. Chem. 20 (1830), 369-400. In dieser gemeinschaftlichen Arbeit werden (S. 390) Cyan- und Knallsäure (nicht aber Cyan- und Cyanursäure) bereits als isomerisch bezeichnet, ganz im Sinne von Berzelius’ Definition: „Körper von gleicher Zusammensetzung und gleichem Atomgewicht nenne ich isomerisch“: Briefwechsel, B. an W. 9.7.1830.
2. Vgl. vorherige Anm.
3. Briefwechsel, W. an B. 22.2.1828.

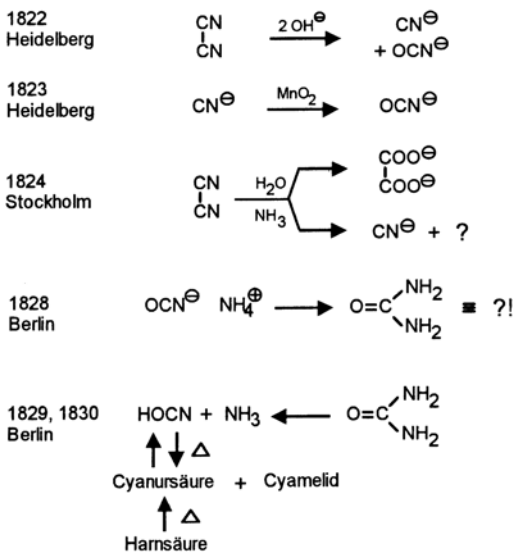


Bild 5:
Wöhlers Cyansäure-Chemie 1823-1830

VI. Kollegenkreis; persönliche Verhältnisse

Ein Meister der Kooperation, weiß Wöhler seinen höchst begrenzten wissenschaftlichen Aktionsradius ganz beträchtlich zu erweitern. Zunächst bietet sich dafür die „Schwedischen Kolonie“ jener weiteren vier Berliner Schüler des Berzelius an, die ebenfalls weiterhin spürbar unter dessen Einfluß stehen.

Mitscherlich (OM Preuß. AdW 1821)[1] war nicht nur Gastgeber für ihn während der ersten Berliner Wochen. Seine Kompetenz und Ressourcen nutzt Wöhler z. B. auch zur Bestimmung des Kristallsystems der Pikrinsäure[2]. Aus den durch dessen schwierigen Charakter bedingten Querelen dagegen hält er sich klug heraus. Heinrich Rose (OM Preuß. AdW 1832) hatte bereits vor Wöhlers Eintreffen dessen Lehrerstelle interimistisch wahrgenommen. Dem

1. Seine Wahl kam nicht auf Vorschlag der Akademie zustande, sondern auf Antrag von Minister Altenstein (EM Preuß. AdW 1822), und erfolgte vermutlich deswegen nur mit geringer Mehrheit. Die Berufung zum Nachfolger von Klaproth als Ordinarius und Akademie-Chemiker verdankt er dem persönlichen Engagement von Berzelius.
2. E. Mitscherlich, Ann. Phys. Chem 13 (1828), 375-76.

alleinstehenden Neuberliner gewährt er Familienanschluß in freundschaftlichster Manier. Beide führen auch gemeinsam „die in seine Arbeiten einschlagenden Versuche mit metallischem Kalium“ aus[1]. Mit Heinrichs Bruder Gustav Rose (OM Preuß. AdW 1834) beginnt er die Untersuchung des von Berzelius bezogenenen Thulits. Wertvolle Mineralien aus dem Ural versorgt ihm Gustav Rose als Teilnehmer der Expedition von 1829 mit Humboldt (aoM Preuß. AdW 1800, OM 1805) und Ch. G. Ehrenberg (KM 1826, OM 1827).

Eng befreundet ist Wöhler auch mit Gustav Magnus (OM Preuß. AdW 1839)[2], mit dem er später wissenschaftliche Reisen nach Frankreich und England unternimmt. Der aus wohlhabender Familie stammende Chemiker, Physiker („einer der letzten jener Reihe hervorragender Forscher …, denen diese beiden Wissenschaften durchaus eine Einheit waren…“)[3] und Technologe habilitiert sich 1831 gegen Mitscherlichs Widerstand an der Universität. Sein Sommerhaus in Sacrow ist wiederholt Absenderangabe auf Wöhlers Briefen. Nach dessen Weggang aus Berlin vertritt er ihn als Lehrer an der Gewerbeschule.

Wöhler selbst als Angehöriger dieses Zirkels kann nach Verlassen Berlins nicht mehr OM der Akademie werden, wird aber 1833 zum KM gewählt, zusammen mit Liebig und Faraday. Schleiermacher (OM 1810), im letzten Lebensjahr stehend, protokolliert die Zuwahl am 20.6.: „…Da aber statt der 31 Mitglieder … nach der Entfernung des H. Ranke nur 21 anwesend waren: so konnte die Wahl nur hypothetisch sein d. h. mit dem Vorbehalt, sie bei nächster günstiger Gelegenheit zu erneuern falls diesmal nicht die nöthige Stimmenzahl von 16 sich für die Vorgeschlagenen vereinigte. … Bei Eröffnung der Kasten fand sich daß die Herrn Liebig in Gießen Wöhler in Cassel und Faraday in London alle Stimmen für sich vereinigt hatten. Es hatten sich inzwischen noch 3 Mitglieder entfernt …“[4]. Zum AM gewählt wurde Wöhler am 26. 7. 1855, wiederum zusammen mit Liebig; die Vorschläge tragen die Unterschriften von Mitscherlich bzw. A. Humboldt und Mitscherlich.

Sigismund Friedrich Hermbstädt (OM 1808), Senior der Berliner Chemiker, frühester Vorkämpfer für Lavoisiers antiphlogistische Chemie in Berlin

1. Briefwechsel, W. an B. 14.3.1826.
2. Das bei D. Hoffmann (Hrsg.), Gustav Magnus und sein Haus, Stuttgart 1995, S. 24, Fußnote 42 angegebene Datum 27.1.40 ist nicht das der Wahl, sondern von deren Bestätigung; die Zuwahl erfolgte am 19.12.1839.
3. W. Ostwald, Gustav Wiedemann; in: Abhandlungen und Vorträge allgemeinen Inhalts. Leipzig 1904, S. 397.
4. A. Truntschke, NTM 27 (1990, Nr. 2), 1-11, hier S. 2.

und Inhaber einer Vielzahl von Ämtern, demonstriert in Gegenwart Wöhlers die Anwesenheit des soeben von Balard als neues Element entdeckten Broms in einer Wasserprobe des Toten Meeres. Der Physiker Johann Christian Poggendorff (OM 1838), der als ehemaliger Apotheker und als viel frequentierter Herausgeber der „Annalen der Physik und Chemie“ auch von letzterer Disziplin eine Menge versteht, hat sein Junggesellendomizil auf dem Sternwartenturm des Akademiegebäudes in der Dorotheenstraße. Ebenso wie bei Magnus finden hier gesellige Zusammenkünfte dessen statt, was man heute die Berliner Sektion der scientific community nennen würde; zugegen sind auch „alle unsere chemischen Frauen und Jungfrauen“, Champagner inklusive[1]. Dies schließt nicht aus, daß es ernsthafte Spannungen gibt, speziell zwischen Poggendorff und Mitscherlich.

Für den Privatgelehrten Thomas Johann Seebeck (OM 1818), bekannt vor allem durch seine Entdeckung der Thermoelektrizität, stellt Wöhler „mehrere Unzen absolut reines“ Nickel und Kobalt her. Vom Oberprovisor Wittstock der Hofapotheke übernimmt er Erfahrungen zur Isolierung von Strychnin und anderen Alkaloiden[2]. Zusammen mit dem Apotheker Kindt (einer Zufallsbekanntschaft beim Warten auf den Schweden-Segler 1824, wo er ihn zur Verbesserung der Kalium-Produktion überredet hatte und so zu einem kostbaren Gastpräsent für Berzelius gelangte) weist er bei einem Besuch in Lübeck 1827 Brom im Ostseewasser nach.

Eine besondere Rolle in den Kooperationsbeziehungen spielt Liebig, nicht nur als Widerpart im Falle der Cyanat-Analyse. Meinungsverschiedenheiten gibt es auch über den angeblichen Stickstoff-Gehalt der Mellithsäure und die vermeintliche Abwesenheit von Oxidationsstufen des Stickstoffs in der Pikrinsäure („Kohlenstickstoffsäure“); auch hier erweist sich Wöhlers Auffassung jedesmal als die richtige. Aber die Kontroversen bringen beide einander näher; Wöhler schlägt deshalb eine Reihe gemeinsamer Publikationen vor und initiiert damit eine ausgesprochen moderne länderübergreifende Forschungskooperation. 1830 bietet er dem Jüngeren das Du an, was in eine einzigartige lebenslange Gelehrtenfreundschaft zwischen diesen höchst konträren Charakteren mündet, dem temperamentvollen, streitbereiten Liebig und dem maßvollen, beschwichtigenden, vermittelnden Wöhler.

Konzentriert sich Wöhlers Rolle als Kommunikator auch vorwiegend auf die Wissenschaft (von und nach Schweden reisende Naturforscher beispiels-

1. Briefwechsel, W. an B., 4.1.1831.
2. Ebenda, W. an B. 22.4.1827.

weise machen Station bei ihm in Berlin), so beschränkt sie sich doch nicht darauf. Für Berzelius z. B. beschafft er Erzeugnisse des Berliner Eisengusses, führt Verhandlungen mit dem Medailleur Gottfried Bernhard Loos und ist Verbindungsmann zu Humboldt oder L. Gmelin. Mit Leopold von Buch (OM Preuß. AdW 1808), Freund Humboldts und ebenfalls Kammerherr, geht er in Theater, Konzerte und die Berliner Gesellschaft.

Im Gegensatz zu Liebig und charakteristisch für ihn bescheidet sich Wöhler klar mit der experimentellen Seite der Wissenschaften. „Das Organ für philosophisches Denken fehlt mir gänzlich, so gänzlich wie das für Mathematik. Nur zum Beobachten habe ich, wie ich mir einbilde, eine passable Einrichtung im Gehirn“[1]. Entsprechend reserviert ist seine Meinung zu den Vertretern der Philosophie (mit Hegel hatte er übrigens 1825 Am Kupfergraben 4a unter einem Dach gewohnt und gelegentlich Whist gespielt). Für Hegels Nachfolger Henrik Steffens (OM 1835) findet er kein gutes Wort. „In seinen Vorlesungen trug er u. a. vor, der Diamant sei nichts anderes als ein zu sich selbst gekommener Quarz. Ich traf ihn einmal beim Essen im Café royal und erzählte ihm von Untersuchungen, von Thatsachen, mit denen ich beschäftigt war. »Das ist alles ganz gut, lieber Doctor«, sagte er, »aber es ist nicht der wahre Weg in der Naturforschung; verlassen Sie diese Richtung und schlagen Sie sich zu uns, da werden Sie zu anderen Erkenntnissen kommen«“[2, 3].

Längst des Junggesellenlebens überdrüssig, heiratet Wöhler 1830 seine Kusine Franziska Wöhler aus Kassel. Am Pfingstsonntag 1831 kommt Sohn August zur Welt, womit sich die von Berzelius anläßlich der Harnstoff-Synthese gemachte Anspielung auf eine „zoochemische Synthese“ im Gewerbeschulhaus als durchaus hellseherisch erweist.[4]

Wenige Wochen darauf rückt die „asiatische“ Cholera heran. Wöhler bringt Frau und Baby Ende Juli zu den Schwiegereltern nach Kassel; auch

1. Briefwechsel, W. an L. 12.11.1863.
2. Ebenda.
3. Wöhlers hervorragendes Gedächtnis beweist ein fast 39 Jahre älterer Brief an Berzelius vom 31.3. 1825, gleich nach seiner Ankunft in Berlin: „… Steffens ist jetzt hier und hat durch seine verrückten Vorlesungen großes Aufsehen gemacht. … Wenn man in Stockholm etwa noch nicht wissen sollte, was der Diamant ist, so wissen Sie, daß der Diamant, nach Steffens unwiderleglichem Ausspruch, ein zu sich selbst gekommener Quarz ist.“ – Die Kenntnis vom Urheber dieser öfter zitierten „Definition“ scheint verloren gegangen zu sein, deshalb sei sie hier mitgeteilt. A. W. Hofmann als profunder Wöhler-Biograph jedenfalls konnte sich keiner dieser beiden Quellen entsinnen, und der Chemiehistoriker Edmund Oskar Lippmann schlußfolgerte aus einem Humboldt-Brief, sie stamme von C. G. Carus.
4. Briefwechsel, B. an W. 7.3.1828; ebenda,W. an B. 7.11.1830.

Mitscherlich flieht mit Familie aus Berlin. Wöhlers Frau gerät in Panik, er nimmt schließlich unbegrenzten Urlaub und folgt ihr, nachdem er zuvor noch auf Bürgermeister Bärensprungs Geheiß eine „Cholera-Chlor-Anweisung für die hiesigen städtischen Cholera-Districts-Vorsteher“ verfaßt. Obwohl die Seuche kürzer als befürchtet in Berlin wütet,[1] entwickelt sich die Situation letztlich dahin, daß – unter durchaus honorigen Umständen – eine Trennung von der Gewerbeschule erfolgt. Bestrebungen nicht fern vom neuen familiären Umfeld führen im Folgejahr zur Errichtung einer Höheren Gewerbeschule in Kassel, an die Wöhler verpflichtet wird. Hier bleibt er bis zu seiner Berufung 1836 als Nachfolger Stromeyers an die Universität Göttingen, seinem letzten und bedeutendsten Schaffensort.

Durch unglückliche Verstrickungen geht er Berlin verloren, nicht aber der Wissenschaft – anders als sein einstiger Hausgenosse Hegel, der ein Opfer der Cholera wird.

1. „Weil sie hier so schlecht behandelt wird“, witzelt Zelter doppelsinnig Goethe (AM Preuß. AdW 1806) gegenüber. E. Arnhold, Goethes Berliner Beziehungen, Gotha 1925, S. 350.

Heinz Kautzleben

Geschichte und Philosophie der Geophysik

Es folgen die Thesen des Vortrages, den ich im Vorfeld des 300. Jahrestages der Gründung der Kurfürstlich Brandenburgischen Sozietät der Wissenschaften am 18.05.2000 in der Sitzung der Klasse Naturwissenschaften der Leibniz-Sozietät e.V. gehalten habe. Die vollständige Fassung meiner Arbeit zu diesem Thema wird demnächst in den „Abhandlungen der Leibniz-Sozietät“ veröffentlicht werden.

Forschungen zur Geschichte und Philosophie der Geophysik in der Leibniz-Sozietät sind wohlbegründet und notwendig. Die von Leibniz inaugurierte Sozietät und die sie weiterführende Königlich Preußische bzw. Preußische Akademie der Wissenschaften, Deutsche Akademie der Wissenschaften zu Berlin (DAW)und schließlich Akademie der Wissenschaften der DDR (AdW) haben den Geo-, Montan- und Kosmoswissenschaften, darunter der Geophysik und ihren Teilgebieten, stets hohe Aufmerksamkeit gewidmet und bedeutende Beiträge zu deren Entwicklung geleistet. In der Liste ihrer ordentlichen und korrespondierenden Mitglieder (AkM) finden sich viele bedeutende Geophysiker und Vertreter der Gebiete, aus denen die Geophysik sich herausbildete, der Teil- und der Nachbargebiete. Einige werden schon in den Thesen genannt. Zu verschiedenen Zeiten bestanden bei der Akademie auch Forschungseinrichtungen zur Geophysik. Bereits an der Sternwarte der Akademie wurden geophysikalische und Geophysik relevante Forschungen betrieben. Die DAW bzw. AdW unterhielt mehrere große Institute für geophysikalische Forschungen, die mit ihren Leistungen internationale Anerkennung erreichten. Es gibt viele Studien über Einzelfragen zur Geschichte der Geophysik in der Leibnizschen Sozietät bzw. Akademie. Eine zusammenfassende Darstellung steht noch aus.

1. Die Konstituierung und die Anerkennung der Geophysik als selbständige Wissenschaftsdisziplin erfolgte erst zum Ende des 19. Jhd., allerdings nach sehr langem Vorlauf von mehreren ihrer Richtungen innerhalb der benachbarten Wissenschaftsgebiete.Die Konstituierung der Geophysik als eigener Disziplin ist nur zu verstehen in Verbindung mit der Entwicklung der Nachbardisziplinen und den politisch-wirtschaftlichen Entwicklungen jener Zeit. Im Vortrag werden der Begriff „Geophysik“ und die heute übliche Definition rückschauend auch auf die frühere Zeit angewendet.

2. Eine genaue Definition der Disziplin Geophysik hat sich nicht eingebürgert. Der Begriff wird im weiteren und im engeren Sinne verwendet. Die

Geophysik im engeren Sinne befaßt sich allseitig mit der Erde als Planeten, umfassend und eingehend mit dem Erdkörper (der „festen Erde“).

3. Als eigene Wissenschaftszweige neben der Geophysik im engeren Sinne gelten die Meteorologie, die Ozeanologie, die Hydrologie, die solar-terrestrische Physik sowie die Angewandte Geophysik. Aber auch die heutige Geophysik im engeren Sinne ist untergliedert in mehrere Teilgebiete, die ihre eigene Geschichte haben und zum Teil so umfangreich und selbständig sind, daß sie als eigene Wissenschaftszweige behandelt werden könnten. Deren Beziehungen zu den Nachbardisziplinen waren über mehr oder weniger lange Zeiten und sind manchmal auch heute enger als ihre Verbindungen mit Teilgebieten innerhalb der Geophysik.

4. Als Hauptprobleme und -gebiete der Geophysik im engeren Sinne gelten heute:

a) Ortsbestimmung, Figur und Schwerefeld der Erde – Geodäsie und Gravimetrie;
b) Erdbeben und Struktur des Erdinnern – Seismologie;
c) Erdmagnetismus – Geomagnetismus und solar-terrestrische Physik;
d) Erdwärme – Geothermie;
e) die Synthese – Theorie der Erde, Geodynamik.

5. Als Entwicklungsetappen der Geophysik kann man unterscheiden:

I. Ursprünge und Anlauf – Antike bis 16./17. Jhd.
II. Aufschwung und Ausprägung – im 17. und 18. Jhd.
III. Konsolidierung, Entfaltung, Vertiefung – im 20. Jhd.,
Höhepunkt Internationales Geophysikalisches Jahr 1957/58
IV. Geophysik im Zeitalter der Computer und der Raketen

6. Der Komplex „Ortsbestimmung, Navigation, Landes- und Erdvermessung, Kartendarstellung, Erdfigur“ bildet das erste geophysikalische Problem, das – schon im Altertum - erfolgreich bearbeitet werden konnte. Das Lösungsverfahren ist die sukzessive Approximation. Das Problem ist immer noch nicht genau genug gelöst. Entscheidende Beiträge haben die AkM Maupertuis, Gauß, Helmert u.v.a. geleistet.

Die Deutung der „Erdfigur“ als Gleichgewichtsfigur einer rotierenden gravitierenden flüssigen Masse wurde zum Ausgangspunkt für die Ausarbeitung der mathematisch-physikalischen Potentialtheorie.

Die Gravimetrie hat keine Vorläufer in der Antike. Sie entwickelte sich – beginnend mit dem Pendel – mit der relevanten Meßtechnik.

Die Geschichte von Geodäsie und Gravimetrie ist gut erforscht. Die geophysikalische Begründung und ihr Zusammenwirken mit den anderen Teilgebieten der Geophysik bedürfen weiterer historischer Studien.

7. Erdbeben sind Teilen der Menschheit seit Urzeiten bekannt. Erste Versuche zur natürlichen Erklärung unternahmen die griechischen Naturphilosophen. Die wissenschaftliche Erforschung entwickelte sich im Rahmen der Geographie, sie nutzte/nutzt die Geologie (bezüglich der Ursachenforschung) und die Physik (bezüglich der Beobachtung und Analyse). Sie formierte sich im 19. Jhd. innerhalb weniger Jahrzehnte zum Wissenschaftsgebiet Seismologie, was mit der Konstituierung der Geophysik als selbständiger Disziplin eng verbunden war. An hervorragender Stelle wirkte dabei das AkM Wiechert. Die Seismologie hat sich zum führenden Teilgebiet der Geophysik im engeren Sinne entwickelt; größte praktische Bedeutung hat die angewandte Seismik erlangt. Zu würdigen ist hier u.a. AkM Meißer.

8. Der Erdmagnetismus ist diejenige geophysikalische Erscheinung, deren Wirkung dem Menschen schon früh bekannt wurde, obwohl er sie mit seinen unbewaffneten Sinnen nicht wahrnehmen kann. Die Natur hat ihm mit dem Magneteisenstein ein Hilfsmittel gegeben. Die frühe Erforschung des Erdmagnetismus ist eng mit der Entwicklung und dem Einsatz des Magnetkompasses verbunden. Diese markieren den Übergang zur Neuzeit. Der äußere Anteil am Erdmagnetfeld und damit der Einfluß der Sonne wurde in der ersten Hälfte des 18. Jhd. entdeckt. Die Nutzung von künstlichen Erdsatelliten und Raumsonden führte schließlich zur Abspaltung der solar-terrestrischen Physik. Die Vorstellungen über die Ursachen der geomagnetische Erscheinungen konnten in der zweiten Hälfte des 20. Jhd. entscheidend verbessert werden: über die äußeren Anteile im Rahmen der sich stürmisch entwickelnden solar-terrestrischen Physik und über das geomagnetische Hauptfeld und seine Säkularvariation durch die Entwicklung der Magnetohydrodynamik im tiefen Erdinnern; die inneren Anteile, die durch die äußeren Feldanteile induziert werden, erwiesen sich als nützlich für das Studium der elektrischen Eigenschaften des Erdkörpers. Die Beschäftigung mit dem Erdmagnetismus hatte mehrmals eine Pionierfunktion in der Entwicklung der Wissenschaften. Die historische Entwicklung der geomagnetischen Forschung, bei der an entscheidenden Stellen die AkM Alexander von Humboldt, Gauß, Adolf Schmidt, Bartels, Lauter, Steenbeck u.v.a. wirkten, ist recht gut dokumentiert.

9. Die thermischen Erscheinungen an und unmittelbar unter der Erdoberfläche sind den Menschen durch ihre sinnliche Wahrnehmung seit Urzeiten bekannt. In Gebieten mit aktiven Vulkanen haben schon die antiken Naturphilosophen ein glutflüssiges Erdinneres angenommen. Messungen wurden nach der Erfindung des Thermometers durch Galilei, seiner Verbreitung im 17. und 18. Jhd. und seiner Entwicklung zum Einsatz im Bohrloch (durch AkM Magnus) in der Mitte des 19. Jhd. möglich. Die Geothermie als besonderes Forschungsgebiet entstand in der ersten Hälfte des 19. Jhd. Bis heute sind die Vorstellungen über die Ursachen des Wärmeflusses, der Temperatur im Erdinnern und die thermische Entwicklung der Erde auf Analogien und Modellrechnungen angewiesen, die stark von den Annahmen über die stoffliche Zusammensetzung des Erdinnern abhängen, die zumeist von der Geochemie und der Kosmoschemie übernommen werden.

10. Bevor zum Ende des 19. Jhd. der Name „Geophysik“ üblich wurde, nannte man die integrierenden, theoretischen Untersuchungen zur Struktur und Dynamik des Erdkörpers „Theorie der Erde“; sie beruhten auf wenigen Beobachtungen. Solche Untersuchungen wurden von Newton, Huyghens und Zeitgenossen begründet, besonders von der französischen Akademie über mehr als ein Jahrhundert gefördert, beteiligt waren die bedeutendsten mathematischen Physiker jener Zeit, in Deutschland die AkM Euler, Gauß, Bessel u.a. Die Physikalisierung der Seismologie gegen Ende des 19. Jhd. brachte innerhalb weniger Jahrzehnte neue direkte Daten über den inneren Aufbau des Erdkörpers. Etwa ab der Mitte des 20. Jhd. war die Zeit reif für die Verbindung der vorwiegend strukturell orientierten Untersuchungen mit den schon seit dem 19. Jhd von den Geologen angestellten Spekulationen über Langzeitvorgänge im Erdinnern und den Forschungen zur Thermodynamik des Erdinnern. Mit der Formulierung der sog. Plattentektonik rückte in den Mittelpunkt die Dynamik des Erdinnern. Zugleich erfolgte ein Wandel des schon im 19. Jhd. von Geologen und Astronomen geprägten Begriffs „Geodynamik“. Die „Geodynamik“ ist heute eine integrierende Arbeitsrichtung der Geowissenschaften. Ihre zentrale Aufgabe ist die mathematisch-physikalische Durcharbeitung von Hypothesen und Theorien und die Ausarbeitung von in sich konsistenten Modellen.

11. Die Geophysik nimmt einen spezifischen Platz in der Wissenschaft ein. Sie ist Teil der Geo- und Kosmoswissenschaften und gehört zu den Naturwissenschaften wie auch zu den Ingenieurwissenschaften. Die Geophysik leistete und leistet bedeutende Beiträge zur Entwicklung der Wissenschaft allgemein und zur Welterkenntnis. Dabei ist das wissenschaftliche, philoso-

phische und praktische Problem zu lösen, daß das von der geophysikalischen Forschung entwickelte und genutzte Modell für das Erd- und Weltbild soweit verfeinert und mit Details angereichert werden muß, daß es der individuellen und sozialen Erfahrung von Nichtgeophysikern, insbesondere von Laien, zugänglich und für diese überprüfbar wird.

12. Die Probleme, mit denen sich die Geophysik befaßt, ergeben sich aus alten und modernen, praktischen und geistigen Bedürfnissen der Menschheit: Überleben in der natürlichen Umwelt, wirtschaftliche Nutzung der natürlichen Ressourcen, Herrschaft über die Territorien, Herrschaft über die Hirne, Unterhaltungsbedürfnis und Geltungsdrang. Die Bearbeitung ihrer Probleme führte und führt die Geophysik vielfach auf Fragestellungen, die über die ursprüngliche Aufgabe soweit hinaus reichen, daß sie für die Praxis z.T. weniger relevant sind, von der Philosophie diskutiert werden.

13. Die Geophysik ist in Forschung, Lehre und wissenschaftlicher Dienstleistung in die Gesellschaft integriert; sie befriedigt gesellschaftliche Bedürfnisse (politische, militärische, wirtschaftliche; Verhaltensprognose, Katastrophenschutz) unmittelbar; sie verbindet die Befriedigung der gesellschaftlichen Bedürfnisse mit den Fortschritten in Wissenschaft und Technik.

14. Die Geophysik hat sich bei der Bearbeitung von z.T. sehr alten Problemen entwickelt. Sie hat sich als eigene Disziplin etabliert, als die älteren und die benachbarten Disziplinen diese Probleme nicht mehr bearbeiten konnten oder wollten. Ähnliches gilt für die Anwendung der geophysikalischen Methoden zur Erforschung des Erdmondes, der anderen Planeten und der kleinen Körper des Sonnensystems.

15. Die Geophysik ist eine Kombinationswissenschaft; sie wird charakterisiert durch ihren Gegenstand und ihre spezifische Methode. Sie verbindet verschiedene Zweige der Wissenschaft; sie entwickelt sich in Wechselwirkung mit den Basisgebieten Geographie, Geologie, Astronomie, Physik und Mathematik, auch der Chemie.

16. Methodisch kennzeichnend für die Geophysik – und mit fundamentalen methodologischen und philosophischen Problemen verbunden - sind die Anwendung physikalischer Instrumente und Methoden, die Anwendung mathematischer Verfahren und die Rückführung auf allgemein gültige physikalische Gesetze. Geophysik beginnt in den Geowissenschaften, wenn das Problem mit den qualitativen Methoden der anderen Gebiete nicht mehr gelöst werden kann.

17. Die Geophysik ist eine Approximationswissenschaft. Sie erfordert eine hohe Beobachtungsgenauigkeit; deren weitere Steigerung führt stets auf neue wissenschaftliche Probleme. Die Geophysik entfaltet ihre Eigenheiten z.T. erst dann, wenn die relevanten physikalisch und/oder philosophisch-erkenntnistheoretisch interessanten Gesetzmäßigkeiten und Grundzüge bereits erkannt sind.

18. Die Geophysik arbeitet in einem großen natürlichen physikalischen Labor. Sie macht kaum physikalische Experimente; sie beobachtet - unter Einsatz von Instrumenten, die sinnliche Wahrnehmung genügt ihr nicht. Die Beobachtungen müssen gegen technogene Störungen geschützt werden.

19. Die Geophysik bietet eine „Momentaufnahme“ der Erdentwicklung. Diese muß in das Langzeitverhalten der geophysikalischen Phänomene über möglichst den gesamten Zeitraum seit der Entstehung der Erde eingepaßt werden, zu dessen Ableitung indirekte (archäo- und paläogeophysikalische) Methoden entwickelt und eingesetzt werden. Die Geophysik ist insofern auch eine historische Wissenschaft.

20. Die Entwicklung der Geophysik ist mit der Entwicklung der Technik verbunden und von ihr abhängig, unmittelbar von der Entwicklung der Meßtechnik (Instrumente), der Träger der Meßtechnik (Schiff, Mittel des Landtransports, Flugzeug, Raketen/Satelliten), der Kommunikationstechnik, der Rechentechnik.

21. Geophysik ist Großforschung; die Organisation der Forschung spielt eine entscheidende Rolle: Observatorien; Stationsnetze, Expeditionen/Feldaufnahmen; nationale und internationale Organisationen (Institute, staatliche Dienste, regionale und globale internationale Programme und Organisationen).

22. In der Geophysik spielen die politischen Bedingungen und Bedürfnisse eine maßgebende Rolle.

23. Deutsche Wissenschaftler haben die Geophysik im 19. und beginnenden 20. Jhd. inhaltlich und organisatorisch wesentlich gefördert. Ihr Höhenflug wurde durch den 1. Weltkrieg beendet. Dominierend wurden die britischen, z.T. auch die französischen Geophysiker. Seit mehreren Jahrzehnten dominieren die Geophysiker der USA. Zeitweise hatten auch die Geophysiker der Sowjetunion Weltgeltung.

24. Die Geophysik in Deutschland ist heute institutionell zersplittert; sie glänzt durch einzelne Leistungen, ihr Einfluß im Weltmaßstab ist sporadisch.

Die einzige Großforschungseinrichtung in der BRD – das GeoForschungs-Zentrum Potsdam – entstand erst 1991 auf der Grundlage und in Weiterentwicklung des Zentralinstitutes für Physik der Erde der Akademie der Wissenschaften der DDR.

Heinz Kautzleben

Beiträge zur Geschichte der Geophysik und Kosmischen Physik

Unter diesem neuen Titel erscheint seit dem Jahre 2000 eine schon länger bekannte Schriftenreihe mit jährlich etwa zwei Bänden. Bisher liegen 4 Bände vor:

- Band 1 (2000): Kausalität, Teleologie und Willensfreiheit als Problemkomplex der Naturphilosophie, 72 Seiten;
- Band 2 (2000): Geschichte und Philosophie der Geophysik, 220 Seiten;
- Band 3 (2001): Über den Äther in der Physik, 236 Seiten;
- Band 4 (2001): Wege zur Wissenschaft, 284 Seiten.

Die Reihe wird herausgegeben von Wilfried Schröder, dem engagierten Bremer Geophysik-Historiker, der im Jahre 2001 zum Mitglied der Leibniz-Sozietät e.V. gewählt wurde. Sie erscheint im Eigenverlag des Herausgebers, der Science Edition Bremen, und ist im ISSN unter der Nr. 1615-2844 registriert. Alle Bände können zum Selbstkostenpreis beim Herausgeber (Hechelstr. 8, D-28777 Bremen) bezogen werden.

Die Reihe wird als Publikationsorgan des Arbeitskreises Geschichte der Geophysik und Kosmischen Physik bezeichnet. W. Schröder ist Mitbegründer und die treibende Kraft dieses Arbeitskreises, einer privaten informellen Vereinigung, dessen Vorsitzender Hans-Jürgen Treder, Mitglied der Leibniz-Sozietät / Akademiemitglied seit 1966, ist.

De facto setzt W. Schröder mit der Reihe unter dem neuen Titel die Schriftenreihe „Newsletters of the Interdivisional Commission on History of the International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA)“ fort, die er in ähnlicher Weise seit vielen Jahren herausgegeben hat. Er war lange Zeit Chairman der European Section of the IAGA Commission. In der Schriftenreihe mit diesem Titel sind insgesamt 42 Bände erschienen, wobei die letzten beiden Bände identisch mit den Bänden 1 und 2 der neuen Reihe sind.

Zu erwähnen ist, daß über längere Zeit die Bände der Reihe auch als Publikationsorgan des Arbeitskreises Geschichte der Geophysik der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft (DGG) bezeichnet wurden, und zwar zu der Zeit, in der H.-J. Treder der Vorsitzende dieses Arbeitskreises und W. Schröder dessen Sekretär waren. Dieser Arbeitskreis wurde inzwischen

(2000) mit nicht einleuchtender Begründung vom Vorstand der DGG aufgelöst. Treder und Schröder setzen seitdem ihre organisatorische und publizistische Tätigkeit in ungebundener Weise im eingangs genannten Arbeitskreis fort.

W. Schröder gebührt Anerkennung für seine unermüdliche Tätigkeit als Herausgeber der gesamten Schriftenreihe. An zahlreichen Bänden hat er auch als Autor mitgewirkt. Ebenso sind seine Leistungen als Organisator der IAGA-Commision und der beiden Arbeitskreise zu würdigen.

Die Bände der Reihe „Newsletters...“ und ihrer Fortsetzung als „Beiträge...“ sind dank ihrer Kosten sparenden Herstellungs- und Vertriebsform auch in den Ländern der ärmeren und armen Welt verfügbar. Der Aufwand für die redaktionelle Bearbeitung und die technische Herstellung der broschierten Bände war (erkennbar) stets minimal.

Die Bände enthalten jeweils mehrere Artikel in deutscher bzw. in englischer Sprache. Manche Artikel sind Wiederabdrucke von Publikationen, die sonst nicht mehr oder nur sehr schwer zu erhalten sind.

Die Bände können durchweg als wesentliche Beiträge zur Erforschung der Geschichte der Geophysik und ihrer Wechselbeziehungen mit den Nachbargebieten und auch mit der Philosophie bezeichnet werden.

Die Reihe ist gekennzeichnet durch die Vielfalt und große Breite der Themen. Einige Bände enthalten die Vorträge von Tagungen, andere sind Festschriften, die meisten bringen thematisch grob geordnete Artikel-Sammlungen. Bei letzteren zeigen sich deutlich die thematischen Interessen von H.-J. Treder und W. Schröder.

Einige Bände der „Newsletters ...“ sind bereits in den „Sitzungsberichten der Leibniz-Sozietät“ rezensiert worden. Da es nicht sinnvoll ist, alle Bände der gesamten Reihe detailliert zu besprechen, werden hier nur - exemplarisch - die oben erwähnten vier ersten Bände der Reihe mit dem neuen Titel (also die vier bisher letzten Bände der gesamten Reihe) vorgestellt.

Der Band 1 enthält den Wiederabdruck des Vortrages, den der hervorragende Meteorologe Akademiemitglied Hans Ertel am 11.02.1954 in der Sitzung der Klasse für Mathematik und allgemeine Naturwissenschaften der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin zum Thema „Kausalität, Teleologie und Willensfreiheit als Problemkomplex der Naturphilosophie“ gehalten hat und der in den Sitzungsberichten der DAW veröffentlicht wurde. Der Vortrag ist die einzige publizierte philosophische Arbeit von Hans Ertel. In ihr sucht er dem Problem mit der Aufstellung und Diskussion von Gleichungssystemen beizukommen. Dem Artikel folgen fünf Diskussionsbeiträ-

ge aus heutiger Sicht: der drei Meteorologen Heinz Fortak, Wolfgang Böhme und Karl-Heinz Bernhardt, des Physikers Hans-Jürgen Treder gemeinsam mit Wilfried Schröder und des Philosophen Herbert Hörz. Sie werten übereinstimmend die Arbeit als bedeutendes Zeitdokument, das die Argumentationen eines erfolgreichen Naturwissenschaftlers zu prinzipiellen philosophischen Fragen zeigt, wichtige Ideen mit bleibendem Wert enthält und viele Anregungen zum Nach- und Weiterdenken gibt.

Band 2 „Geschichte und Philosophie der Geophysik“ ist ein Sammelband mit einem Hauptbeitrag, den W. Schröder aus Bauteilen zusammengestellt hat, die von ihm selbst, H. Hörz und K.-H. Wiederkehr verfaßt wurden, und ca. 10 weiteren Beiträgen von G. M. Friedman, G. P. Gregori u.a., G. Dohr, L. Kristjannson, H. und K.-H. Bernhardt, K.-H. Wiederkehr, W. Schröder und J. C. Gianibelli. Wie vom Herausgeber in seiner Vorbemerkung angekündigt, gibt der Band einen Einblick in einige aktuelle Probleme der Erforschung der Geophysik-Geschichte. Es werden ausgewählte Ansätze angeboten, philosophische Rückfragen gestellt und wird an mehreren (gut ausgearbeiteten) Fallstudien die Problematik konkretisiert. Eine zusammenfassende Erörterung wurde aber noch nicht erreicht. Der Band zeigt erneut, was in den Forschungen zur Geophysik-Geschichte noch zu leisten ist. Das wird mühsam sein und viel Sorgfalt bei der Integration der Teilerkenntnisse erfordern.

Band 3 „Über den Äther in der Physik“ trägt einen Untertitel, der (in der englischen Übersetzung) den Inhalt kennzeichnet: Die Diskussion zwischen Albert Einstein, Gustav Mie und Emil Wiechert. Im Band werden wieder abgedruckt: eine Arbeit Einsteins (Das Raum-, Äther- und Feldproblem der Physik), sieben Veröffentlichungen von Emil Wiechert, der als Geophysiker von Göttingen aus Weltgeltung errungen hat, zu den Problemen Äther und Gravitation und drei Veröffentlichungen von Gustav Mie zur Theorie der Materie, außerdem einige Briefe von Gustav Mie an David Hilbert. Hinzu kommt der Abdruck eines Artikels von W. Schröder, in dem er ein unveröffentlichtes Manuskript Emil Wiecherts über den Äther und die Einsteinsche Relativitätstheorie publiziert und kommentiert. Der Band wird eingeleitet mit einem Artikel von Treder und Schröder „Das Äther-Problem bei Einstein, Mie und Wiechert“. Es ist nicht verwunderlich, daß Emil Wiechert, der von der Physik zur Geophysik kam, sich intensiv mit den Grundfragen der Physik befaßte. Seine Vorstellungen als die eines erfolgreichen Naturforschers verdienen es, eingehend erforscht zu werden. Allerdings kommt Treder zur Fest-

stellung: „Wiecherts Arbeiten zur Relativitätstheorie (und auch zu Machs Äußerungen) hatten keinen nachweisbaren Einfluß auf Einstein."

Der Band 4 „Wege zur Wissenschaft" hat den Untertitel: Gelehrte erzählen aus ihrem Leben. Insgesamt kommen 24 Wissenschaftler selbst zu Wort, über 16 wird berichtet. Vertreten sind Pioniere auf dem Gebiet der Geo- und Kosmoswissenschaften, aber auch weniger prominente, z. T. jüngere Wissenschaftler. Die Texte sind autobiographisch bzw. biographisch. Berichtet wird über das persönliche Leben, die wissenschaftliche Arbeit, die Entwicklung der Ideen, auch über Begegnungen, die den Lebensweg und die wissenschaftliche Arbeit bestimmt haben. Entstanden ist ein buntes Bild, das durch keine Vorgaben des Herausgebers verfälscht ist - ein lehrreicher und zugleich unterhaltsamer Einblick in das Abenteuer Wissenschaft. Der Band nimmt in der Schriftenreihe bisher eine Sonderstellung ein. Es ist zu hoffen, daß ähnliche Bände folgen werden.

Herbert Hörz

Chronopsychobiologie und Stress

Emotioneller Stress durch Überforderung und Unterforderung, hrsg. von Karl Hecht, Ovidiu König, Hans Peter Scherf, Schibri-Verlag, Berlin, Milow 2001, 575 Seiten

Die interdisziplinäre Arbeitsgruppe "Zeitrhythmik" der Leibniz-Sozietät hat sich zweimal mit Ergebnissen der Stressforschung, vorgetragen von Karl Hecht, befasst. Die Gruppe begann mit der Arbeit, nachdem Franz Halberg, Vater der Chronobiologie, inzwischen Mitglied der Leibniz-Sozietät, im Januar 2001 über Ergebnisse seiner chronobiologischen Forschungen vor der Klasse Naturwissenschaften sprach. Weitere Erkenntnisse trug er im Januar 2002 vor. Die Chronobiologie erfasst Zeitstrukturen. Halberg machte deutlich, wie wichtig 7-tägige/24-stündige chronobiologisch auswertbare Blutdruck- und Herzfrequenzüberwachung zur Verhütung schwerwiegender Kreislaufkrankheiten ist. Hecht baut bei den Untersuchungen zum Stress auch auf den Forschungsergebnissen von Halberg auf. Nun liegt mit dem Buch eine umfassende Darstellung des chronobiopsychologischen Herangehens an den Stress vor, das nicht nur Fachleute interessiert.

Das Buch enthält die Ergebnisse der 2. Berliner Stressforschungstage vom April 2000, deren Präsident Karl Hecht, Gründer des Instituts für psychosoziale Gesundheit, war. Von den 33 Beiträgen hat er 16 als Autor oder Mitautor gezeichnet. Mitherausgeber sind der Facharzt für Allgemeinmedizin Hans-Peter Scherf, der sich mit Allergien und besonders mit dem Cetirizin befasst, und Ovidiu König, zu dessen Forschungsschwerpunkten auch die Lärmforschung und die Psychoakustik gehören und der mit Karl Hecht zu "Stress und Tinnitus" publizierte. Das Spektrum der Probleme ist groß. Stressmechanismen aus molekularer und ganzheitlicher Sicht, behandelt von Peter Oehme, Karl Hecht und Winfried Krause, stehen am Anfang. Es folgen Überlegungen zur Physiologie der Einsamkeit, zur Hypokinese, zum Lärm und zum Gähnen. Die elektromagnetischen Felder werden als Stressor untersucht. Stress in bestimmten Bereichen, bei der Feuerwehr, beim Telefonieren während des Autofahrens, in der Klinik, im Alter, bei Prüfungen, bei Musikern, bei Lehrern usw. sind Gegenstand von Studien. Immer geht es um die

mögliche Über- oder Unterforderung, um exakte Daten, um Diagnosen und um mögliche Therapien. Am Schluss stellt der Sozialmediziner Walter Kofler aus Innsbruck Überlegungen zum Emotionellen Stress unter dem Aspekt des Modells der Kybernetischen Evolutionären Sozialmedizin an.

Mediziner, Biowissenschaftler und Psychologen, Vertreter anderer Disziplinen mögen sich für den einen oder anderen fachspezifischen Aspekt des Buches besonders interessieren. Mich hat als Wissenschaftsphilosophen vor allem das den Forschungen zu Grunde liegende Bild vom Menschen, das ganzheitliche Herangehen, die Berücksichtigung seiner Individualität, seiner subjektiven Fähigkeiten und die Beachtung der Zeitrhythmen und Zyklizitäten im Sinne der Chronobiopsychologie beeindruckt. Von Patienten hört man, sie seien nur als eine bestimmte Krankkeit vom Arzt wahrgenommen worden. Stress ist so wissenschaftlich nicht zu erfassen, weil nicht auf bestimmte Organe oder Funktionen beschränkt. Er ist eine Wechselbeziehung zwischen Individuen und ihrer sozialen und natürlichen Umgebung. Er kann nur verstanden werden, wenn man äußere Reize, die physiologischen Funktionen, psychische Reaktionen und ihre Grundlagen im Zusammenhang mit Aktivitäten des Subjekts sieht. Menschen gestalten ihre Lebensbedingungen immer effektiver und humaner. Doch gibt es unterschiedliche Typen, die teils passiv erdulden, teils auf Umstände nur reagieren oder sie doch aktiv verändern. Die chronobiopsychologischen Regulationsdiagnostiker um Karl Hecht und andere wollen dieses ganzheitliche Menschenbild, das subjektive Aktivität und biologische Rhythmen beachtet, dazu nutzen, um durch neue Erkenntnisse bessere Ergebnisse bei der Diagnostik und Therapie von Stress zu erreichen. Das korrespondiert mit einer philosophischen Auffassung, die Zeit nicht nur als Dauer, Ordnung und Richtung des Geschehens fasst, sondern sie auch als Lebensgefühl und Gestaltungsprinzip begreift.

Es geht um die ständige aktive Anpassungsleistung durch Regulation der psychobiologischen Homöostase. Die normale Beanspruchung des Menschen, als Eustress bezeichnet, schwankt im Laufe des Lebens. Hecht macht deshalb auf Unterforderungen aufmerksam, "wenn sich Monotonie, Einsamkeit, Stimulationsmangel, Informationsdefizit, Bewegungsarmut und Langeweile einstellen. Andererseits ist mit Überbeanspruchung der psychobiologischen Regulation zu rechnen, wenn Überforderungen, Erhöhung des Lebenstempos, Informationsüberfluss und Reizüberflutung sowie Störung des Lebensrhythmus vorherrschen. Unter bestimmten Umständen können sich Unter- und Überbeanspruchung als Disstress reflektieren ..." (S. 11) Emotioneller Stress wird als zeitweilige oder permanente Veränderung

der individuellen psychophysiologischen Homöostase verstanden, der sich als Eustress, der psychologischen Funktion und als Distress, der pathologischen Abart, äußert. Die Autoren des Buches orientieren sich so an einer ganzheitlich ausgerichteten und regulationstheoretisch fundierten Konzeption.

Die Diskussion um Stress ist nicht neu und wird immer wieder kontrovers geführt. Hans Selye, mit dem ich 1974 während einer Konferenz in Paris über seine Auffassungen dazu diskutierte, betrachtete Stress als "the spice of life". Er forderte einen Lebensstil, der in Harmonie mit den Naturgesetzen den Stress als positive Kraft für persönliche Entwicklung und Wohlbefinden nutzt. Sein 1974 publiziertes Buch mit dem Titel "Stress without Distress" verdeutlicht in Bildern die vielfältige Funktion von Stress, wenn etwa die Freude Leonard Bernsteins an der kreativen Gestaltung dem Lärm entgegengesetzt wird, den Straßenbauer erdulden müssen. Da er auch den Freudenstress mit sowjetischen Emigranten auf dem israelischen Flughafen symbolisierte, meinte er, wenn wir in der DDR sein Buch bringen würden, könnte er diese Bilder problemlos durch andere ersetzen. Stress hat eben auch mit bestimmten kulturellen Hintergründen, Wertesystemen und Normen als Wertmaßstab und Verhaltensregulator zu tun. Das wird deutlich, wenn Bernd Willkomm "Veränderungen des normativen Bezugssystems durch längerdauernden Auslandseinsatz" (S. 128 -134) betrachtet und dabei die Frage aufwirft, was normal ist. Das Verständnis der Normalität hängt von den Umständen und Erfahrungen ebenso ab, wie von erlernten und erlebten Werten und Normen. Kann ein Individuum ein Ereignis nicht als normal akzeptieren, auch wenn es den normativen Bezugsrahmen erweitert, dann führt das zu einer Traumatisierung. (S. 130) Bei "out of area"-Einsätzen treffen nach der Rückkehr meist inkongruente Weltbilder aufeinander, "das verschobene des Heimkehrenden und das weitgehend unveränderte seines sozialen Umfelds." (S. 132) Das führt nicht selten zu schwer lösbaren sozialen Problemen. Auch die Belastung durch die Konfrontation mit stark leidenden, verletzten oder toten Menschen z. B. bei Feuerwehreinsätzen bringt Gewissenskonflikte mit sich (S. 104) und fordert die individuelle Kompetenz zur Bewältigung von emotionalen Krisen heraus, die durch äußere Hilfe zu erhöhen ist.

Zentrales Kapitel des Buches ist das von Karl Hecht verfasste "16. Chronobiopsychologische Regulationsdiagnostik (CRD) zur Verifizierung von funktionellen Zuständen und Dysregulationen." (S. 193 - 252) Er spricht von einem diagnostischen Vakuum bezüglich des frühzeitigen Verifizierens und Erkennens von funktionellen und psychischen Störungen und stellt fest:

"Überhaupt fehlt den Allgemeinmedizinern ein diagnostisches Instrumentarium zum objektiven Nachweis von Schmerz, Angst, Depressionen, Erschöpfung, Disstress und Schlafstörungen." (S. 193) Dieses Vakuum könnte mittels chronobiopsychologischer Regulationsdiagnostik gefüllt werden, welche "die funktionelle (biopsychosoziale und zeitliche) Ganzheit eines Menschen erfassen soll." (S. 196) Sie werde seit 15 Jahren erprobt und umfasse chronobiologische und psychobiologische Grundlagen, wie die Messbarkeit emotioneller Reaktionen, Bestimmung von Funktionszuständen durch Periodenvariabilität, Regulationstheorien und die Aktivierungstheorie. Gegenüber den Stichprobenuntersuchungen wird das frequenzmodulierte Verfahren mit Zeitreihenmessungen bevorzugt, um biologische Rhythmen besser erfassen zu können. Die Bedeutung der CRD wird in verschiedenen Studien belegt und auch mit der Qualitätssicherung in der Psychotherapie in Verbindung gebracht. (S. 403 - 420)

Auch Nichtmedizinern kann das Buch durch den Philosophen empfohlen werden, denn es befasst sich mit einer Problematik, mit der wir alle zu tun haben, mit dem Stress durch Über- oder Unterforderung. Es ist schon interessant, wenn bei den gerontologischen Studien bestätigt wird, "dass lebenslanges Training der geistigen Funktionen sogenannte Alterseffekte minimiert oder ausschließt." (S. 163) Das Buch gibt interdisziplinär orientierten Kolleginnen und Kollegen viele Anregungen über das existierende Menschenbild, die Berücksichtigung der Individualität und Rolle von Rhythmen und Zyklizitäten nachzudenken.