promet
Jahrgang 31 Heft 2–4
2005
meteorologische fortbildung
Deutscher Wetterdienst

1905

100 Jahre Atmosphärensondierung

am Meteorologischen Observatorium Lindenberg

2005

promet

Herausgeber
Deutscher Wetterdienst

Hauptschriftleiter
Dr. H. D. Behr (Hamburg)

Redaktionsausschuss
Dipl.-Met. U. Gärtner (Offenbach a. M.)

Prof. Dr. G. Adrian (Offenbach a. M.)
Prof. Dr. B. Brümmer (Hamburg)
Prof. Dr. J. Egger (München)
Prof. Dr. F. Fiedler (Karlsruhe)
Prof. Dr. G. Groß (Hannover)
Dr. J. Neisser (Lindenberg)
Prof. Dr. C.-D. Schönwiese (Frankfurt a.M.)
Prof. Dr. P. Speth (Köln)
Prof. Dr. G. Tetzlaff (Leipzig)

Zum Titelbild:

100-jährige Entwicklung von Messsystemen am Observatorium Lindenberg:

1905:
- Drachen (l. o., Archivbild MOL),
- Aspirationspsychrometer (r. o., Archivbild MOL),

2005:
- Troposphären-Wind-Profil-RADAR (l. u., Foto: H. Steinhagen, MOL),
- Mikrometeor. Messkomplex am 99 m-Mast (r. u., Foto: F. Beyrich, MOL),

Windenhaus (Mitte, Foto: D. Dauß, MOL).

pro*met* erscheint im Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes – Kaiserleistraße 29/35, 63067 Offenbach am Main. Bezugspreis pro Jahrgang (4 Hefte) im Abonnement 22,50 €, Einzelheft 6,50 €, Doppelheft 13,– €, Dreifachheft 19,50 € zuzüglich MwSt. und Versandkosten.
Für den Inhalt der Arbeiten sind die Autoren verantwortlich. Alle Rechte bleiben vorbehalten.

Satz:
Elke Roßkamp
Deutscher Wetterdienst, Hamburg

Druck:
Weppert Print & Media GmbH
97424 Schweinfurt
Silbersteinstraße 7

ISSN 0340-4552

Meteorologische Fortbildung

31. Jahrgang, Heft 2–4, 2005

Thema des Heftes:
100 Jahre Atmosphärensondierung am Meteorologischen Observatorium Lindenberg
Fachliche Redaktion: J. Neisser, Lindenberg
Fachliche Durchsicht: P. Speth, Köln

Kapitel		Seite
	Zu diesem Heft	81
1	J. NEISSER, H. STEINHAGEN Die Historie des Meteorologischen Observatoriums Lindenberg 1905–2005	82-114
2	G. ADRIAN, H. GRAßL Die Rolle der Observatorien heute	115-118
3	M. WELLER Untersuchung von Strahlungsflüssen am Meteorologischen Observatorium Lindenberg	119-128
4	U. LEITERER Fortschritte in der Aerologie und Wetterbeobachtung am Meteorologischen Observatorium Lindenberg	129-133
5	D. ENGELBART Bodengebundene Fernerkundung am Meteorologischen Observatorium Lindenberg	134-147
6	F. BEYRICH, T. FOKEN Untersuchung von Landoberflächen- und Grenzschicht-Prozessen am Meteorologischen Observatorium Lindenberg	148-158
7	W. K. ADAM, H. DIER Lange Messreihen zur Wetter- und Klimaforschung am Meteorologischen Observatorium Lindenberg	159-170
8	F. H. BERGER, J. NEISSER Das Meteorologische Observatorium Lindenberg – nationaler und internationaler Referenzstandort –	171-177
	Blick nach draußen Der Spanische Wetterdienst	178-181
	Institute stellen sich vor Das Institut für Meteorologie und Klimatologie der Universität Hannover	182-185
	E. RUDOLPH Einfluss sehr hoher Abflüsse auf die Wasserstände in der Tideelbe	186-190
	C. BECK, J. GRIESER, B. RUDOLF, U. SCHNEIDER Globale Niederschlagsanalysen des Weltzentrums für Niederschlagsklimatologie für den Zeitraum ab 1951	191-196
	P. LEMKE 25 Jahre Weltklimaforschungsprogramm	197-200
	O. KOPATZ Institutionalisierung der Meteorologie in Deutschland und Gründung der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft	201-208
	K. HOFIUS Die globale Bewertung internationaler Gewässer	209-210
	Buchbesprechungen	211-212
	Habilitationen, Promotionen sowie Diplomhaupt- und Masterprüfungen im Jahr 2004	213-216
	Anschriften der Autoren dieses Heftes	217

promet, Jahrg. 31, Nr. 2–4, 81-81 (Oktober 2005)
© Deutscher Wetterdienst 2005

Thema des Heftes: 100 Jahre Atmosphärensondierung am Meteorologischen Observatorium Lindenberg

Zu diesem Heft

Das Wetter als Synonym für das Zusammenspiel von physikalischen und chemischen Parametern in der Atmosphäre spielt seit jeher eine wichtige Rolle im Leben der Menschen. Schon früh entstand der Wunsch nach Informationen über das zukünftige Wetter. Dieser Wunsch, der von dem allgemeinen menschlichen Streben nach Erkenntnis und Wissen über die Gesetzmäßigkeiten der umgebenden Natur unterstützt wurde, war vor allem dort ausgeprägt, wo das Wetter durch intensive interdiurne und saisonale Variationen geprägt wird, z.B. auf dem europäischem Kontinent. Am Anfang der Bemühungen standen Wetterbeobachtungen an Einzelstationen, oft nur sporadisch, später entstanden Messnetze, die synchrone Beobachtungen durchführten. Heute ist die praktische Wetterbeobachtung und auch die Atmosphärenforschung ohne das weitverzweigte globale Beobachtungsnetz undenkbar. Die Stationen verteilen sich überall auf der Erdoberfläche bis auf die Gebirgsgipfel und auf den Ozeanen. Mit Ballonen, bodengebundenen Fernsondierungsverfahren und Flugzeugen werden Daten aus der freien Atmosphäre gewonnen und seit dem Start des ersten Erdsatelliten vor fast 50 Jahren wird das Wetter auch aus dem Weltall observiert.

Meteorologische Observatorien haben in diesem Beobachtungssystem eine besondere Stellung, deren Bedeutung noch weiter ansteigt. Während an den üblichen Beobachtungspunkten die exakte Durchführung von Messungen im Vordergrund steht, werden an Observatorien darüber hinaus langfristige Untersuchungen zu speziellen Problemen mit unikalen Gerätesystemen durchgeführt, und es erfolgt eine wissenschaftliche Begleitung bei der Interpretation für das vielfältige Monitoringprogramm. Die experimentellen Forschungen sind auch erforderlich, um auf neue Entwicklungen bei der Simulation von Wetter und Klima mit einem geeigneten Beobachtungsprogramm reagieren und um neue Methoden der Mess- und Interpretationstechnik übernehmen zu können, und diese Forschungen sind auch notwendige Voraussetzung für die Vervollkommnung der operationellen Beobachtungs- und Messnetze. Mit dem Anspruch an die Observatorien, stets qualitätsgeprüfte Daten des breiten Monitoringsprogramms bereitzustellen und gleichermaßen experimentelle Forschungen durchzuführen, entsteht angesichts der zunehmend begrenzten Ressourcen ein Kapazitätsproblem, das nur durch eine enge Kooperation mit Einrichtungen aus der Grundlagenforschung und des wissenschaftlichen Gerätebaus sowie eine aktive Mitwirkung in komplexen Forschungsprogrammen einer Lösung zugeführt werden kann.

Das Anliegen des vorliegenden Heftes ist es, die Stellung eines meteorologischen Observatoriums in der gegenwärtigen Wetter- und Klimaforschung am Beispiel des Meteorologischen Observatoriums Lindenberg zu zeigen. Der äußere Anlass ist das Jubiläum zum 100-jährigen Bestehen des Lindenberger Observatoriums im Oktober 2005. So steht am Anfang eine zusammengefasste Historie des Observatoriums (Kap. 1). Die Gründung des Königlich-Preußischen Aeronautischen Observatoriums Lindenberg entstand zwangsläufig aus der Forschungsstrategie des Preußischen Meteorologischen Instituts, dass auf die Forderungen aus der meteorologischen Forschung und der entstehenden Wettervorhersage nach Informationen über Atmosphärenparameter aus der sogenannten dritten Dimension mit einem belastbaren Monitoringprogramm für die freie Atmosphäre reagieren musste. Nach dem historischen Abriss werden in Kap. 2 aus der Sicht des globalen Klimaforschungsprogramms der WMO sowie der praktischen Anforderungen bei der Modernisierung von Beobachtungssystemen und bei der Bereitstellung von Daten für die Wettervorhersage die gegenwärtigen Aufgaben der Observatorien des DWD zusammengefasst. Die entsprechenden Forderungen nach belastbaren Daten können an den Observatorien nur durch ein breites Spektrum sich ergänzender und überlappender Spezialmessanlagen und eine entsprechende wissenschaftliche Forschung erfüllt werden.
Die Kap. 3 bis 6 geben einen Überblick über die Schwerpunkte des Observatoriumsprogramms am Meteorologischen Observatorium Lindenberg und liefern eine Auswahl typischer Forschungsergebnisse. In den abschließenden Beiträgen (Kap. 7, 8) werden die z. T. seit 100 Jahren kontinuierlich laufenden Messungen für zeitliche Trendaussagen ausgewählter Parameter benutzt und die Mitwirkung des Meteorologischen Observatoriums Lindenberg als anerkannter Referenzstandort in vielfältigen internationalen Programmen und globalen Überwachungsnetzen mit der Zielstellung eines Beitrags zur Erdsystemvorhersage dargestellt. Die notwendigen gesellschaftlichen Zukunftsentscheidungen verpflichten uns, die Forschungsobservatorien als permanentes experimentelles Gewissen der Klima- und Umweltforschung zu erhalten und die bereitgestellten Informationen durch internationale Vernetzung der Referenzstandorte zu verbessern. Die aufzuzeigen, ist auch Ziel des vorliegenden Heftes.

Es ist Anliegen der Fachredaktion, das sehr kooperative Zusammenwirken mit den Autoren und der Schriftleitung hervorzuheben und für die vielfältige Unterstützung bei der technischen Anfertigung des Manuskriptes Frau Doris König und Herrn Karsten Schrobitz, beide vom Meteorologischen Observatorium Lindenberg, zu danken.

J. Neisser

promet, Jahrg. 31, Nr. 2–4, 82-114 (Oktober 2005)
© Deutscher Wetterdienst 2005

J. NEISSER, H. STEINHAGEN

1 Die Historie des Meteorologischen Observatoriums Lindenberg 1905–2005

History of the Meteorological Observatory Lindenberg 1905–2005

Zusammenfassung
Aus Anlass des 100-jährigen Bestehens des Meteorologischen Observatoriums Lindenberg (MOL) werden die wissenschaftlichen Aufgaben und wesentlichen Aktivitäten in der wechselvollen Geschichte des Hauses beschrieben. Für die ersten 50 Jahre erfolgt in den Abschnitten 2 und 3 nur eine kurze Darstellung der wesentlichen Meilensteine, da bereits ausführliche Berichte von ASSMANN (1915) und DUBOIS (1957/1993) vorliegen. In den ersten zwei Jahrzehnten nach dem zweiten Weltkrieg standen Beiträge des Observatoriums für den Neuaufbau der aerologischen Routinemessungen in der ehemaligen DDR und ausgewählte Forschungsarbeiten für den sich neu entwickelnden Luftverkehr im Vordergrund (Abschnitt 4). Zwischen 1970 und 1990 (Abschnitt 5) wurden die Arbeitsrichtungen des Observatoriums durch die Mitwirkung am Interkosmos-Programm zur Erforschung der Hochatmosphäre und vorwiegend technisch orientierte Entwicklungen zur Modernisierung von aerologischen Sondierungsverfahren (Radiosondierung, Ozonsondierung, Wettersatellitenempfang) bestimmt. Im abschließenden Abschnitt 6 wird die Integration des MOL in das DWD-Forschungskonzept „Observation und Simulation" während der letzten 15 Jahre erläutert. Dabei stehen die Entwicklung einer neuen Forschungsstrategie und der umfassende Aufbau neuer Observatoriumskomplexe im Vordergrund. Weiterhin werden die wissenschaftlichen Forschungsprogramme (s. a. Kap. 3–7) sowie die wichtige Funktion des MOL als Referenzobservatorium im Rahmen der WMO/WCRP dargestellt.

Abstract
The Meteorological Observatory Lindenberg (MOL) celebrates its 100-year anniversary in October 2005. For this reason the scientific tasks and essential activities in the eventful history of the observatory Lindenberg are outlined in a chronological form. For the first 50 years of the observatory ASSMANN (1915) and especially DUBOIS (1957/1993) have given descriptions on the scientific programme of the observatory in detail. Therefore for this period only a short description is presented in sections 2 and 3. In the first two decades after the second world war the activities of the observatory were concentrated on the reconstruction of aerological routine measurements and on first selected investigations for the air traffic starting anew (section 4). From 1970 to 1990 (section 5) the working programme of the observatory was dominated by the integration in the Interkosmos-Programme. Besides this project for strato- and mesospheric sounding with the help of meteorological rockets a lot of technical developments were realised for the modernisation of the classical aerological monitoring with radiosondes and satellites. Section 6 presents the integration of MOL in the DWD started in 1991/92 in accordance with the conception „Observation and Simulation". This period of the last 15 years was characterised by a new research strategy and the extensive implementation of modern measuring facilities. Furthermore the new scientific priorities (see also chapters 3–7) as well as the important function of MOL as a regional reference station for many international programmes/projects of WMO/WCRP are described.

1 Einführung

Das Jubiläum von 100 Jahren Atmosphärensondierung in Lindenberg ist Anlass, um mit der Historie über die Arbeit des Observatoriums, die stets die Technik des Beobachtens und Messens und die wissenschaftlichen Datenanalysen umfasst hat, einen Einblick zu vermitteln vom Wesen, den Stärken und Grenzen eines meteorologischen Observatoriums im Kontext der Forschungen über Wetter, Klima und atmosphärische Umwelt. Dabei zeigte sich deutlich, dass das Observatorium Lindenberg in all den Jahren mit einem eigenständigen, unikalen atmosphärischen Monitoringprogramm nicht nur den aktuellen Anforderungen aus der atmosphärischen Grundlagenforschung, sondern auch den Herausforderungen an die Meteorologie aus dem gesellschaftlichen Umfeld verpflichtet war. So spiegelt sich die wechselvolle Geschichte Deutschlands im zurückliegenden Jahrhundert vom Kaiserreich bis zur gesamtdeutschen Bundesrepublik auch in den Arbeitsschwerpunkten, der Struktur und dem Unterstellungsverhältnis des Observatoriums wider (s. Tab. 1-1). Aus den Ideen am **P**reußischen **M**eteorologischen **I**nstitut (PMI) hervorgegangen, existierte das Observatorium etwa 30 Jahre als selbständiges (Königlich)-Preußisches **A**eronautisches **O**bservatorium **L**indenberg (AOL). Danach begann eine etwa 10 Jahre währende Zugehörigkeit des AOL zum **R**eichs**w**etter**d**ienst (RWD), in der die wesentlichen Arbeiten durch Kriegsvorbereitung und 2. Weltkrieg überwiegend fremdbestimmt waren. Nach dem Krieg folgte eine etwa 45-jährige Arbeit als Aerologisches Observatorium Lindenberg (AOL) im **M**eteorologischen **D**ienst der DDR (MD seit 1950), in der die Mitwirkung am Aufbau des modernen operativen, aerologischen Beobachtungsprogramms und wissenschaftspolitische Forde-

rungen zur Hochatmosphärenforschung dominierten. Seit 15 Jahren ist das **M**eteorologische **O**bservatorium **L**indenberg (MOL) im **G**eschäftsbereich **F**orschung und **E**ntwicklung des **D**eutschen **W**etter**d**ienstes (DWD, GB FE) mit dem Programm „Observation und Simulation" an modernen Arbeiten zur Wettervorhersage und Klimaforschung beteiligt. Das beinhaltet die Erzeugung und Bereitstellung von Beobachtungen und Daten über physikalische Parameter und Strukturen zum Vertikalaufbau der Atmosphäre aus einem vielfältigen Monitoringprogramm sowie die Entwicklung von wissenschaftlichen Interpretationsverfahren und die Adaption moderner Messsysteme für den operationellen Wetterdienst.

In den vergangenen 100 Jahren ergab sich sehr häufig der Widerspruch zwischen den Herausforderungen an die Kontinuität und Qualität des anspruchsvollen Observatoriumsmonitoringprogramms einerseits und dem unbedingten Anspruch zur wissenschaftlichen Verfolgung und Mitwirkung bei der Nutzung neuer Beobachtungs- und Interpretationsmöglichkeiten andererseits. Dieser Widerspruch war in der Vergangenheit und ist sicherlich auch in Zukunft nur lösbar durch eine Kooperation mit anderen Forschungseinrichtungen im nationalen und internationalen Rahmen sowie durch die Beteiligung des Observatoriums an neuen Forschungsprojekten und Messexperimenten.

Die Fülle der Aktivitäten in Lindenberg lässt im vorliegenden Rahmen nur eine fragmentarische Darstellung zu. Für die ersten 50 Jahre kann auf ausführliche und authentische Darstellungen von ASSMANN (1915) bzw. DUBOIS (1957/1993) verwiesen werden. Weiterhin liegt eine ausführliche Würdigung des Lebenswerkes des Gründers des Observatoriums Richard Aßmann von STEINHAGEN (2005) vor. Dazu ergänzend existieren Monographien über eng verwandte meteorologische Einrichtungen dieser Epoche von KÖRBER (1993, 1997), WEGE (2002), KÄSE und ZIEMANN (1992, 1994). In allen Abhandlungen sind umfangreiche weiterführende Literaturquellen angegeben, so dass in den Abschnitten 2 und 3 auf eine erneute Auflistung verzichtet wurde. In den folgenden Abschnitten 4 bis 6 werden die Entwicklung des AOL im Rahmen des MD der DDR und die Neuprofilierung des MOL ab 1991 im DWD dargestellt.

Benennung des Observatoriums	Direktes Unterstellungsverhältnis/Zugehörigkeit	Direktor/Leiter
Königlich-Preußisches Aeronautisches Observatorium Lindenberg (1905–1918)	Preußisches Kulturministerium (1905–1934) davon: 1923–1927: gemeinsames Direktorat für AOL und PMI (einschl. Obs. Potsdam) unter Leitung des Dir. AOL 1932–1934: Unterstellung des AOL unter PMI	R. Aßmann (1905–1914)
Preußisches Aeronautisches Observatorium Lindenberg (AOL) (1918–1934)		H. Hergesell (1914–1932)
		H. v. Ficker (1932–1934)
Aeronautisches Observatorium Lindenberg (1934–1946)	Reichsministerium für Luftfahrt – Reichswetterdienst (RWD) – (1934–1945)	W. Marten (1934–1936)
		H. Koschmieder (1936–1942)
		E.F. Herath (1942–1945)
	Rote Armee, Hauptverwaltung Hydrometeorologischer Dienst (1945)	W.A. Belinski (05/1945–12/1945) (Bevollmächtigter der Roten Armee)
Aerologisches Observatorium Lindenberg (AOL) (1947–1990)	Landeswetterdienst Brandenburg – Zentralobservatorium Potsdam – (1946–1949)	P. Beelitz) (1946–1949)
	Meteorologischer Dienst der DDR (MD) – Abteilung Forschung – (1950–1990) (1952–1964 Hydro-Meteorologischer Dienst)	M. Robitzsch (1950/01–03)
		P. Dubois (1950–1969)
		P. Glöde (1969–1990)
Meteorologisches Observatorium Lindenberg (MOL) (seit 1991)	Deutscher Wetterdienst (DWD) – GB FE – (seit 10/1990)	J. Schwirner (Beauftragung) (1991)
		J. Neisser (1992–2004)
		F.H. Berger (seit 07/2004)

Tab. 1-1: Historie des Observatoriums Lindenberg 1905–2005.

2 Das PMI – die Vorgeschichte des Lindenberger Observatoriums

Die Frage nach dem Gründungsdatum des Observatoriums ist durchaus nicht einfach zu beantworten und wurde in der Vergangenheit von den Verantwortlichen auch unterschiedlich entschieden. Der Grund dafür sind vielfältige Vorarbeiten und Vorläufereinrichtungen zu Ende des 19. Jahrhunderts, die den Anspruch rechtfertigen, dass ohne die dort durchgeführten wissenschaftlichen Arbeiten und Experimente die Gründung des Lindenberger Observatoriums im Jahre 1905 und dessen von Beginn an sehr effektive Tätigkeit kaum möglich gewesen wäre. Zusätzlich gab es auch eine Kontinuität in der wissenschaftlichen Mannschaft und in den grundsätzlichen fachlichen Programmen vor und nach 1905. Die Wurzeln des Lindenberger Observatoriums liegen im Preußischen Meteorologischen Institut (PMI). Das PMI wurde auf Initiative von Alexander von Humboldt am 17.10.1847 durch eine Königliche Kabinettsorder als wissenschaftliche Abteilung innerhalb des Statistischen Büros in Berlin gegründet und existierte bis zur Übernahme in den Reichswetterdienst im Jahre 1934. Mit dem PMI verbinden sich Namen wie W. Mahlmann, H.W. Dove, W. v. Bezold (Abb. 1-1), G. Hellmann und H. v. Ficker. In den ersten 40 Jahren des PMI wurde in Anlehnung an Aktivitäten der Royal Society und der Mannheimer Gesellschaft ein Netz von etwa 35 meteorologischen Stationen in Preußen errichtet und kontinuierlich betrieben. Die Interpretationsarbeiten waren dabei vorwiegend auf statistische Auswertungen gerichtet. In den 80er Jahren des 19. Jahrhunderts erfolgte durch Wilhelm von Bezold, der 1885 die erste deutsche Professur für Meteorologie an der Universität Berlin erhalten hatte, eine vollständige Reorganisation. Am PMI gab es danach drei Abteilungen unter G. Hellmann (Allgemeines, Klimatologie), R. Aßmann (Gewitter und außerordentliche atmosphärische Vorkommnisse) und A. Sprung (Instrumente). In dieser Zeit existierten bereits wichtige Arbeiten zur theoretischen Durchdringung der Physik der Atmosphäre (z. B. H. v. Helmholtz, W. v. Bezold), und es mussten belastbare experimentelle Atmosphärensondierungen in Bodennähe und in der Höhe aufgebaut werden.

Für die bodengebundenen wissenschaftlichen Sondierungen wurde in der Zeit von 1888 bis 1892 das **M**eteorologisch-**M**agnetische **O**bservatorium in **P**otsdam (MMOP) als Teil des PMI errichtet. Dabei engagierte sich besonders A. Sprung, der 1892 zum ersten Vorsteher des MMOP ernannt wurde. R. Aßmann (Abb. 1-2) hatte sich bereits seit Jahren intensiv mit den Möglichkeiten zur Sondierung in der freien Atmosphäre, der 3. Dimension beschäftigt. Die Anforderungen nach Vertikalsondierungen kamen von der sich entwickelnden Wettervorhersage und dabei nicht zuletzt von der aufblühenden Luftfahrt. Bergstationen allein konnten keine verlässlichen Höheninformationen liefern. Aßmann bereitete mit seinen langjährigen Kontakten und seiner aktiven Mitwirkung im „Deutschen Verein zur Förderung der Luftschiffahrt" die Nutzung der Luftfahrt für wissenschaftliche Zwecke vor. Gleichzeitig hatte er das von ihm entwickelte Aspirations-Psychrometer so verbessert, dass ein verlässliches Temperatur- und Feuchtemessgerät für Messungen in der freien Atmosphäre zur Verfügung stand (Abb. 1-3). Diese Vorarbeiten von Aßmann am PMI waren die Voraussetzung für eine in der Aerologie bahnbrechende Serie von „Berliner wissenschaftlichen Luftfahrten" zwischen 1888 und 1899. A. Berson, ein Mitarbeiter von Aßmann, erreichte dabei am 04.12.1894 mit dem Freiballon „Phönix" (Abb. 1-4) die Rekordhöhe von 9.155 m bei einer Lufttemperatur von –47,9 °C. A. Berson stellte auch zusammen mit R. Süring am 31.07.1901 mit dem Freiballon „Preußen" (V = 8.400 m³) die neue

Abb. 1-1: Wilhelm v. Bezold (1837–1907).

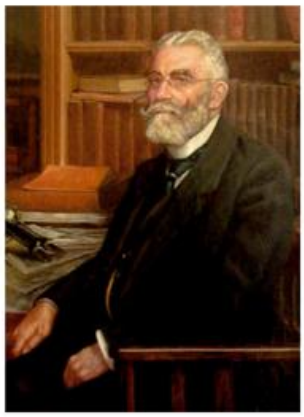


Abb. 1-2: Richard Aßmann (1845–1918).

Abb. 1-3: Aßmanns Normal-Aspirationspsychrometer, konstruiert von R. Fuess.

Abb. 1-4: Korb des Freiballons „Phönix" (V = 2.577 m³), links: Kipparm für Psychrometer mit Ablesung per Fernrohr; über dem Ableser Aneroid-Barometer. Zeichnungen von H. Groß in Wissenschaftl. Luftfahrten, Bd. 1, Vieweg Verlag 1899.

Rekordhöhe von 10.800 m auf, die über 27 Jahre als Weltrekord Bestand hatte. R. Aßmann hatte einen sehr kreativen Gedankenaustausch mit den Pionieren auf dem Gebiet der meteorologischen Drachen- und Ballonsondierungen am französischen Observatorium Trappes bei Paris, Teisserenc de Bort und mit A. J. Rotch vom amerikanischen Observatorium auf dem Blue Hill. Bei der Auswertung seiner Registrierballonmessungen kam R. Aßmann nahezu gleichzeitig und im Kontakt mit Teisserenc de Bort zu der Erkenntnis, dass in Höhen oberhalb von etwa 9 km eine „zweite Inversion" regelmäßig und großräumig existiert. Beide Gelehrte hatten so die später als Stratosphäre genannte Schicht entdeckt, in der die für die Troposphäre typische vertikale Temperaturabnahme in Isothermie bzw. Temperaturzunahme übergeht. Bereits am 1. April 1899 erhielten die Arbeiten am PMI durch Gründung einer Abteilung IV „Abteilung für wissenschaftliche Luftfahrten", die von Aßmann geleitet wurde, zunehmende Bedeutung. Aßmann erkannte, dass für viele in der Aerologie noch offenen Fragen tägliche aerologische Sondierungen erforderlich sind und so wurde in den Jahren 1899/1900 am PMI die erste deutsche permanent arbeitende Aufstiegsstelle für Drachen, Drachenballone, Registrier- und Freiballone, das sog. Aeronautische Observatorium Berlin-Tegel, aufgebaut. Neben einer Ballonhalle wurde ein 27 m hoher Windenturm zum Start der Drachen als Geräteträger errichtet (Abb. 1-5). Am 1. April 1900 wurde der offizielle Betrieb des Observatoriums Tegel aufgenommen und nach 10 Tagen, am 11. April, folgte der Start der Messungen mit Drachen. Ab Januar 1903 konnten in Tegel tägliche Fesselaufstiege durchgeführt werden. Parallel dazu erfolgten von 1899 bis 1904 42 Messfahrten mit Freiballonen. Erstmalig konnten regelmäßig Messungen über den Vertikalverlauf wichtiger meteorologischer Parameter bereitgestellt werden. 1903/04 erfolgen für ein Jahr simultane Drachenaufstiege an den etwa 250 km voneinander entfernten Stationen in Berlin-Tegel (R. Aßmann) und Hamburg (W. Köppen). R. Aßmann führte für Ballonsondierungen geschlossene Gummiballone ein und erreichte so für alle Registrierballonsondierungen ab etwa 1901 eine wesentliche Verbesserung bei der Sondierungshöhe sowie etwa gleichbleibende Steiggeschwindigkeiten.

Abb. 1-5: Aeronautisches Observatorium Berlin-Reinickendorf (Tegel), links: Windenturm (27 m) für Drachenaufstiege.

Dieses systematische Wirken von Aßmann erhielt durch den Direktor des PMI W. v. Bezold hohe Anerkennung und Unterstützung. Als Mitglied des Internationalen Meteorologischen Komitees bewirkte W. v. Bezold, dass R. Aßmann zusammen mit A. Berson und W. Köppen Mitglied der neu geschaffenen „Internationalen Kommission für wissenschaftliche Luftschifffahrt" wurde, als deren erster Vorsitzender von 1896 bis 1914 H. Hergesell tätig war.

3 Die Historie des Observatoriums Lindenberg 1905 bis 1950

3.1 Das AOL unter den Direktoren R. Aßmann und H. Hergesell von 1905 bis 1932

Die Arbeiten des Observatoriums in Berlin-Tegel wurden zunehmend durch die Nähe der Großstadt mit Hochspannungsleitungen und Verkehr sowie die Auflagen des am Ort stationierten Luftschiffer-Bataillons erschwert. Der Standort musste aufgegeben werden und eine umfängliche Suche in der Umgebung von Berlin begann. Die Entscheidung fiel für ein Gelände in der Nähe von Lindenberg/Kreis Beeskow. Hier befand sich in der „zivilisatorischen Einöde" Brandenburgs, ohne Stromleitungen und intensiven Verkehr, mit dem Kalkberg ein kleiner Hügel, der die umliegende, überwiegend landwirtschaftlich genutzte Ebene um etwa 30 m frei überragte. Zusätzlich fand man im Abstand von nur etwa 6 km mit dem größten brandenburgischen Gewässer, dem Scharmützelsee, eine Wasserfläche, die für eine konzipierte „schwimmende Drachenstation" geeignet erschien. Bei den Planungen für das neue Observatorium konnte Aßmann auf zahlreiche Erfahrungen aus Tegel und an ähnlichen Einrichtungen im Ausland zurückgreifen. Die Realisierung war jedoch von erheblichen Einwänden des Fiskus begleitet. Dafür fand Aßmann in dem Ministerialdirektor F. Schmidt-Ott einen kongenialen Verwaltungsexperten im Kulturministerium. F. Schmidt-Ott ebnete die Wege am kaiserlichen Hofe und durch die Ministerien und hatte erheblichen Anteil am Aufbau des Observatoriums an dem neuen Standort. In nur etwa einjähriger Bauzeit ab Juni 1904 wurde auf einer Fläche von 28 ha mit einem finanziellen Aufwand von etwa 500.000,-- Mark ein neues hochmodernes aerologisches Observatorium errichtet (Abb. 1-6). Das Vorläuferobservatorium in Tegel war dagegen mit einem Aufwand von 60.000,-- Mark auf nur etwa 2 ha Fläche installiert worden. Die erste Drachensondierung am neuen Standort Lindenberg konnte bereits am 4. April 1905 durchgeführt werden. Am 16. Oktober 1905 erfolgte dann die offizielle Übergabe des „Königlich-Preußischen Aeronautischen Observatoriums" unter Anwesenheit des deutschen Kaisers Wilhelm II. (Abb.

Abb. 1-6: Königlich-Preußisches Aeronautisches Observatorium Lindenberg 1905, Blick von Süden.

Abb. 1-7: Einweihungsfeier des Königlich Preußischen Aeronautischen Observatoriums Lindenberg am 16. Oktober 1905 (historische Postkarte), Ballonhalle. 2. von links: Kaiser Wilhelm II, 3. von links: R. Aßmann.

1-7) und von viel Prominenz aus Wissenschaft und Verwaltung an R. Aßmann, der bis 1914 als erster Direktor in Lindenberg wirkte. Neben dem Windenhaus und der Ballonhalle mit einem Gasometer als Kernstücke für die Fesselaufstiegstechnologie, wurde die gesamte Infrastruktur mit Bürogebäuden, Werkstatt, Wasser-, Energieversorgung und Zuwegungen bis hin zu den Wohngebäuden in einer Baumaßnahme errichtet. Zu der Gründungsmannschaft gehörten insgesamt etwa 25 Beamte, Angestellte und Arbeiter. Als Wissenschaftler waren neben R. Aßmann noch A. Berson, A. Coym sowie die Brüder K. und A. Wegener tätig. Die Hauptaufgabe des Observatoriums bestand in der experimentellen Erforschung der freien Atmosphäre bis in möglichst große Höhen. Dafür mussten geeignete Messgeräte und Geräteträger entwickelt und zum Einsatz gebracht werden.

Die Direktoren R. Aßmann (bis 1914) und H. Hergesell (1914 bis 1932) fühlten sich den Anforderungen aus der Atmosphärenforschung und der Wettervorhersage, besonders der rasch wachsenden Flugwetterberatung, verpflichtet und wirkten ständig für die Realisierung eines zeitlich kontinuierlichen und bis in große Höhen ausgedehnten aerologischen Monitoringprogramms. Für dieses Ziel wurden die Fesselaufstiegstechniken, der Einsatz von Flugzeugen, z. T. auch Luftschiffen als Geräteträger und schließlich die Nutzung von Funkwellen zur Informationsübertragung untersucht und in die tägliche Routine überführt. Parallel dazu wurden neue Messsensoren und vor allem Interpretationsmethoden entwickelt. Damit konnte über drei Jahrzehnte ein aerologisches Messprogramm unter Einsatz von Messgeräten an Drachen, Fesselballone und freifliegenden Registrierballonen sowie für die Höhenwindmessung mit Pilotballonen durchgeführt und eine neue Qualität von Mess- und Beobachtungsdaten aus der freien Atmosphäre erreicht werden. Dieses einzigartige aerologische Sondierungsprogramm in Lindenberg war die Basis für vielfältige wissenschaftliche Arbeiten der eigenen Mitarbeiter und von Fachkollegen. Tab. 1-2 zeigt, dass in den ersten 35 Jahren etwa 32.000 Vertikalsondierungen über dem Standort Lindenberg erfolgt sind. Entsprechend dem mittleren Windangebot entfielen davon etwa 72 % auf Messun-

	Drachen			Fesselballone			Registrierballone			Pilotballone
Zeitraum	Anzahl	mittl. Höhe (Jahresmittel) m	max. Höhe (Datum) m	Anzahl	mittl. Höhe (Jahresmittel) m	Max. Höhe (Datum) m	Anzahl	mittl. Höhe (Jahresmittel) m	max. Höhe (Datum) m	Anzahl
1905–1913	4.342	2.600–3.600	6.780 (17.08.1910)	1.898	2.100–3.700	8.800 (07.07.1911)	232	12.300–15.600	25.050 (20.08.1910)	790
1914–1931	11.211	2.300–4.000	9.750 (01.08.1919)	4.032	1.700–4.300	9.200 (26.09.1916)	455	6.400–18.500	32.000 (14.04.1925)	4.047 max. Höhe: 36.100 m (08.12.1925)
1932–1939 (ohne Abreisser bzw. auswertbar)	3.065	3.300–4.300	7.950 (1939)	1.216	3.200–4.100	7.150 (1938)	410	16.400–22.900	28.430 (04.07.1938)	
1905–1939	18.618		9.750	7.146		9.200	1.097		32.000	4.837

Tab. 1-2: Aerologische Aufstiege über Lindenberg 1905–1939.

gen mit Drachen und etwa 28 % auf den Einsatz von Fesselballonen (Windgeschwindigkeit kleiner etwa 5 m/s). Diese Aufstiegsrate liegt deutlich über den im heutigen aerologischen Routinenetz üblichen zwei Aufstiegen pro Tag. Dabei wurden auch mehrere Rekorde in Lindenberg aufgestellt. So erreichte ein Drachengespann, bestehend aus 8 Drachen, am 01. August 1919 die Höhe von 9.750 m, die noch bis heute als Höhenweltrekord für Drachenaufstiege Gültigkeit besitzt. Bei einem Fesselballonaufstieg am 26. September 1916 wurde mit einer Höhe von 9.200 m ebenfalls ein Rekord aufgestellt. Gleichzeitig wurden in den ersten 8 Jahren am AOL auch noch Freiballonfahrten organisiert. Zwischen 1905 und 1913 waren es insgesamt 23 Fahrten, von denen die Fahrt der Gebrüder Kurt und Alfred Wegener vom 5. bis 7. April 1906 über 52,5 Stunden einen Dauerrekord darstellte. Die Messungen mit Registrierballonen waren von R. Aßmann mit dem Einsatz der Gummiballone bereits ab 1901 entscheidend verbessert worden. Wegen des hohen Anteils der Drachen bei den Fesselaufstiegen konzentrierte man sich danach auf die Verbesserung der Drachentechnik. Ausgangspunkt war der von Hargrave 1892 am Observatorium Sydney in Australien entwickelte Zellendrachen. In Lindenberg wurden verschiedene Formen von Kasten- und Schirmdrachen vom Typ Hargrave entwickelt (Abb. 1-8 und 1-9). Eine ausführliche Beschreibung der in den ersten Jahren am Observatorium Lindenberg eingesetzten Drachen findet man bei ASSMANN (1915) im Kapitel „Die Formen und Größen der Drachen und ihre Verwendung“ (S.103 ff).

Eine entscheidende Verbesserung gelang dem Lindenberger Drachenbaumeister R. Grund mit der Konstruktion des sog. Regulierdrachens (Abb. 1-10). Damit konnte neben der Vergrößerung der Sondierungshöhen durch eine aktive Steuerung der maximalen Zugkraft am Drachendraht auch die Abreißquote deutlich verringert werden. So waren von 1905–1914 15,1 % der Aufstiege Abreißer mit 852 km betroffenem Draht, während von 1932–1939 bei ausschließlicher Verwendung der Regulierdrachen sich die entsprechende Quote auf nur 0,7 % mit 43 km Draht verringerte. Anfangs wurden Rekordhöhen nur von Drachengespannen mit 6–8 Einzeldrachen erreicht. Mit dem Einsatz von Regulierdrachen erreichten auch Einzeldrachen regelmäßig Sondierungen bis 5–6 km Höhe. Beispielsweise stieg am 23.06.1935 ein solcher Drachen bis in 7.550 m Höhe auf. Zur Messung der Basisparameter Temperatur, Feuchte, Druck und Wind fand ausschließlich der von Marvin am Weather Bureau in Washington (USA) etwa 1900 entwickelte Meteorograph (Abb. 1-11) Anwendung, wobei jedoch in Lindenberg sowohl in der Aßmannschen Zeit als auch später vor allem für Ballon-, Flugzeug- und Luftschiff-Einsätze verschiedene Modifikationen konstruiert und zum Einsatz gelangten. Parallel dazu wurden seit Anfang der zwanziger Jahre alle Entwicklungen in der Funktechnik verfolgt, um deren Anwendung bei der aerologischen Datentelemetrie abzuschätzen.

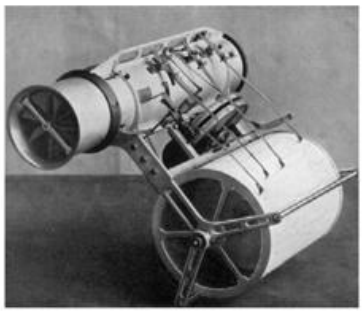


Abb. 1-11: Drachen-Meteorograph nach Marvin für T, F, P, Wind (Modifikation nach R. Aßmann für Wind).

Anfangs bezogen sich die funktechnischen Arbeiten auf die Peilung von Pilotballonen zur Windmessung, später konzentrierten sie sich auf die Übertragung der Messwerte von freifliegenden Ballonen (Radiosonden). Insbesondere P. Duckert begann etwa 1926 unter Verwendung von Erfahrungen in Frankreich (R. Bureau) und Russland (R. Moltschanow) mit der Entwicklung einer deutschen Radiosonde. Nach umfangreichen Testmessungen z. T. an Drachen und Fesselballonen konnten rechtzeitig zu Beginn des Internationalen

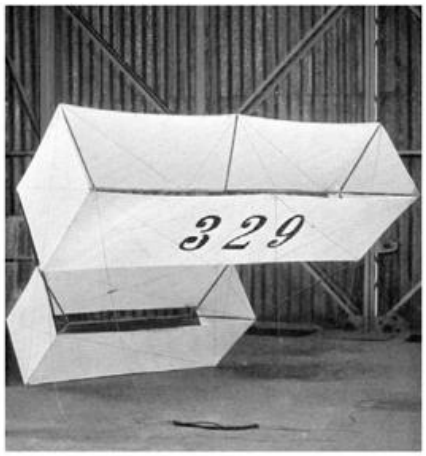


Abb. 1-8: Schirm-Drachen 329 nach Hargrave (Lindenberger Konstruktion nach Schreck).

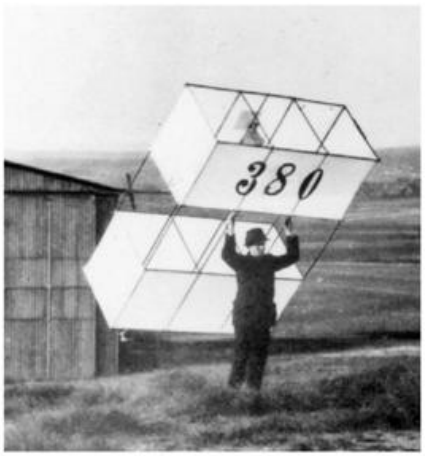


Abb. 1-9: Start eines Normal-Drachens in Lindenberg (links: Ballonhalle).

Abb. 1-10: Lindenberger Regulier-Drachen nach Grund (42 m²) beim Start.

Polarjahres 1932/1933 die ersten operationell an freifliegenden Ballonen einsetzbaren Lindenberger Radiosonden vorgestellt werden (Abb. 1-12). Damit war auch in Deutschland der Übergang der aerologischen Routinemessung von den Fesselflugkörpern zu freifliegenden Ballonen mit Signalübertragung per Funk geschaffen. Parallel zur Entwicklung und zum Einsatz der Sensoren wurden in Lindenberg auch stets die erforderlichen Apparaturen zur Kalibrierung und Eichung der Messgeräte konzipiert und aufgebaut.

Bereits R. Aßmann hatte 1912 versucht, Flugzeuge mit Meteorographen für aerologische Sondierungen zu nutzen. Nach dem 1 Weltkrieg wurde von H. Hergesell der Einsatz von Motorflugzeugen stark gefördert. Von 1921 bis 1931 existierte eine wissenschaftliche Flugstelle des AOL, von der regelmäßige Messflüge, z. T. im direkten Vergleich mit Drachenmessungen gestartet wurden. Erster Leiter dieser Flugstelle in Berlin-Adlershof war K. Wegener, der seit 1913 als erster deutscher Meteorologe eine Flugzeugführererlaubnis besaß. 1922/23 wurden unter seiner Verantwortung 135 Messflüge bis in Höhen von etwa 5 km durchgeführt. Nach einer Zwischenstation in Berlin-Staaken arbeitete die Flugstelle des AOL von 1927–1931 in Berlin-Tempelhof.

Schon als Mitarbeiter des PMI betonte R. Aßmann bei den wissenschaftlichen Freiballonfahrten in den 80er und 90er Jahren des 19. Jahrhunderts stets die Forderung nach einer Nutzung der aerologischen Forschungsergebnisse für die Betreuung der Luftfahrt. Die schnelle Entwicklung der Flugtechnik mit Flugzeugen und auch der Einsatz von Luftschiffen zu Beginn des 20. Jahrhunderts machte diese Forderung noch deutlicher und so kam dem neugegründeten Observatorium Lindenberg eine Vorreiterrolle bei der Flugwetterberatung zu. Folgerichtig errichtete R. Aßmann 1910 am AOL die erste Hauptstelle eines Luftfahrer-Warndienstes mit einer Nebenstelle in Frankfurt a. M. Dafür wurde u. a. ein Netz von 15 Pilotstationen aufgebaut. 1911 folgte ein Gewitterwarndienst mit 600 Stationen in Gesamtdeutschland, die über Postleitungen ihre Beobachtungen an das AOL zur Auswertung weiterleiteten. 1913 wurde in Lindenberg eine spezielle Funkstelle installiert, von der aus auf einer Wellenlänge von 1500 m Gefahrenmeldungen an Luftfahrzeuge im Umkreis von 500 km verbreitet werden konnten. Von der Lindenberger Hauptstelle wurden 1913 insgesamt 1040 Auskünfte durch Luftfahrer eingeholt. Unter dem Direktorat von H. Hergesell wurde diese Tätigkeit des AOL noch wesentlich verstärkt, da er aus seinem langjährigen Engagement für die wissenschaftliche Luftfahrt die meteorlogische Beratungsarbeit besonders bewertete. Bereits vor 1900 hatte H. Hergesell die Pläne des Grafen Zeppelin zum Bau des Motorluftschiffes LZ 1 stark gefördert und sich auch später für den Einsatz von Luftschiffen im Rahmen der Polarforschung aktiv eingesetzt. So wurde in Lindenberg der Luftfahrer-Nachrichtendienst und ein Höhenwetterdienst systematisch aus- bzw. aufgebaut. Ab 1919 wurde ein „Höhenobs" ausgestrahlt, 1920 folgten die „Nachrichten für Luftfahrer" und ab 1922 die „Wetternachrichten für Luftfahrer". Vom April 1925 an erfolgte stündlich der „Höhenwetterdienst Lindenberg" und an allen deutschen Flughäfen wurde durch das AOL eine dezentrale meteorologische Beratung organisiert. Ab 1927 erreiche der modernisierte Sender Lindenberg, für den zwischen 1926 und 1933 u. a. drei 90 m hohe Sendemasten errichtet wurden, eine Reichweite über ganz Europa. Die Leitung des Flugwetterdienstes in Deutschland lag bis zu seinem Ausscheiden im Jahre 1932 in den Händen von H. Hergesell, wobei sich aber eine organisatorische Abgrenzung des Dienstes von der Forschung immer deutlicher als notwendig erwies.

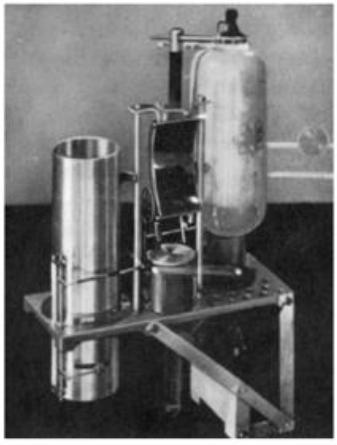


Abb. 1-12: Lindenberg-Radiosonde nach Duckert (Modell 1932), Geber: Bimetall, Bourdonrohr, Haarharfe, Senderfrequenz: 7 MHz.

Die wissenschaftliche Arbeit beinhaltete über den gesamten Zeitraum von 3 Jahrzehnten, wie übrigens bis heute, zunächst die kontinuierliche Bereitstellung qualitätsgeprüfter Lindenberger Temperatur-, Feuchte-, Druck- und Windprofile. Darauf wurde von R. Aßmann und H. Hergesell großer Wert gelegt. Weitergehende Forschungsarbeiten, für die neben dem Standardprogramm der aerologischen Basisparameter auch Spezialmessungen regelmäßig erfolgen mussten, konzentrierten sich auf die folgenden Projekte:

- Untersuchungen zur Windböigkeit und Turbulenz,
- Wolkenuntersuchungen (u. a. mit Pilotballonen),
- Strahlungsmessungen, Messungen der Polarisation des Himmelslichtes und der Trübung,
- luftelektrische, Radioaktivitäts- und Staubmessungen,
- Gesamtozon-Messungen (UV-Spektrograph),
- Entwicklung aerologischer Adiabatendiagramme (Stüve, Robitzsch),
- Untersuchungen über den Zusammenhang von Atmosphärenstruktur und der Ausbreitung von akustischen und elektromagnetischen Wellen (KW-Bereich),
- Untersuchungen über den täglichen Temperaturgang in der freien Atmosphäre auf der Grundlage von über alle Tageszeiten verteilte Aufstiegstermine (für etwa 2 Jahre von 1917 bis 1919),
- Erste Feinstrukturmessungen in der bodennahen Schicht an Masten und mit Drachen.

Detaillierte Ergebnisse wurden vor allem in den eingangs erwähnten Abhandlungen des AOL sowie in der Zeitschrift „Beiträge zur Physik der freien Atmosphäre" publiziert. Die Zeitschrift wurde 1904 von R. Aßmann und H. Hergesell gegründet und existierte mit 28 Bänden bis 1945. Ab 1956 wurde sie von W. Georgi und H. Koschmieder, einem der nachfolgenden AOL-Direktoren, als „Beiträge zur Physik der Atmosphäre" weitergeführt. Im Jahre 2000 wurde sie mit der „Meteorologischen Zeitschrift" verschmolzen.

Die internationale Arbeit des AOL in den ersten drei Jahrzehnten konzentrierte sich auf eine Mitwirkung in den entsprechenden Gremien und die aktive Beteiligung, z. T. Organisation von Expeditionen oder Messkampagnen. Vor dem 1. Weltkrieg lag das Schwergewicht auf Vergleichmessungen und kürzeren Messeinsätzen mit Drachen und Ballonen in Deutschland und Europa. Lediglich 1908 konnte das AOL durch Mittelbeschaffung aus privater Hand eine Ostafrika-Expedition zur Untersuchung der Existenz und Struktur der tropischen Stratosphäre ausrüsten und unter Leitung von A. Berson durchführen. Später beteiligte sich das AOL aktiv an der „Meteor"-Expedition von 1925 bis 1927 im tropischen Atlantik und an den Alfred-Wegener-Grönlandexpeditionen von 1929 und 1930/31. R. Aßmanns Bemühen neben seiner Arbeit in der Internationalen Aeronautischen Kommission war über viele Jahre auf den internationalen Erfahrungsaustausch zur Sondierungstechnik, zur Abstimmung der Messgerätetechnik und zur Organisation von abgestimmten aerologischen Mess-Kampagnen an verschiedenen europäischen Stationen gerichtet. H. Hergesell hat sich als Präsident der Internationalen Aerologischen Kommission von 1896 bis 1914 und nochmals von 1927 bis 1935 an hervorragender Stelle um die internationale Entwicklung der Aerologie verdient gemacht. In den zwanziger Jahren hat er die Arbeiten der Kommission von Europa auf die ganze Welt ausgedehnt. Damit sind von Lindenberg auf dem Gebiet der Aerologie auch Vorarbeiten für das heutige globale Wirken der WMO (CIMO) ausgegangen.

3.2 Das Observatorium Lindenberg von 1932 bis 1945

Nach dem Ausscheiden von H. Hergesell im Jahre 1932 ging für das Observatorium die in seiner 100-jährigen Geschichte nicht wiederkehrende Selbstständigkeit zu Ende. Das AOL wurde zunächst für 2 Jahre Teil des PMI unter dem Direktorat von Heinrich v. Ficker. Diese Entscheidung war sicherlich auch dem Umstand geschuldet, dass die gleichzeitige Bearbeitung aller Fragen der Aerologie und der Luftfahrt unter nur einem wissenschaftlichen und organisatorischen Dach nicht mehr fortzuführen war. H. v. Ficker gelang es unter den schwierigen Bedingungen der Wirtschaftskrise, das Lindenberger Messprogramm mit Fessel- und Registrierballonen, die weitere Erprobung der Radiosondentechnik, eine stabile Datenübermittlung an den Flugwetterdienst und ausgewählte Forschungsprojekte, wie mikrometeorologische Arbeiten (Robitzsch) stabil weiterzuführen.

Im Juli 1934 erfolgte eine einschneidende Veränderung für Lindenberg, die von der bislang überwiegend auf Forschung orientierten Arbeit wegführte. Das AOL wurde Teil des neu geschaffenen **R**eichs**w**etter**d**ienstes (RWD) im Reichsluftfahrtministerium. W. Marten, der in der PMI-Zeit als Vertreter von H. v. Ficker in Lindenberg tätig war, wurde von 1934 bis 1935 Dienststellenleiter. Am AOL begann eine 11-jährige Periode, in der alle aerologischen Arbeiten wegen ihrer strategischen Bedeutung durch die einsetzenden militärischen Vorbereitungen und durch den 2. Weltkrieg fremdbestimmt wurden. Die Pläne des RWD für das AOL erklären auch, warum sofort ausreichende Geldmittel bereitgestellt wurden, um von 1936 bis 1941 eine umfassende Rekonstruktion aller Anlagen in Lindenberg durchzuführen und der Personalbestand erheblich vergrößert wurde. Dafür wurde H. Koschmieder vom Staatlichen Observatorium und der Universität Danzig 1936 zum Direktor des AOL berufen. Er leitete von 1936 bis 1941 die Erneuerungen in Lindenberg mit dem Neubau des Laborgebäudes (heute Labor 1), dem Bau einer Radiosonden-Eichzentrale und eines zweiten Windenhauses mit Ballonhalle sowie eines Wohngebäudes. Weiterhin wurde die gesamte Infrastruktur mit der mechanischen Werkstatt und den Versorgungsanlagen für Gas, Wasser, Abwasser, Elektrizität und Telefon modernisiert. Mit einem Kostenaufwand von 700.000,-- Reichsmark erfolgte nach Koschmieders fachlichem Konzept der Ausbau des AOL zu dem weltweit leistungsstärksten aerologischen Observatorium. Mit der Schaffung eines zweiten Aufstiegsgeländes westlich des Observatoriums konnten auch die Fesselaufstiege, die bei Ostwindlagen durch die Funktürme, deren Anzahl sich 1936 auf fünf erhöhte, erheblich beeinträchtigt waren, ungestört fortgeführt werden. Zwischen 1936 und 1941 wurden mit 3.747 Fesselaufstiegen täglich etwa zwei Profilsondierungen für das aerologische Routineprogramm durchgeführt. Die Regulierdrachen nach Grund wurden bis zu einer Fläche von 64 m² vergrößert (Abb. 1-13). Für Spezialmessungen konnte das AOL Bauaufträge für einen Drachen-

Abb. 1-13: Regulier-Drachen nach Grund vor der Ballonhalle von links: 10, 42, 32, 25, 16, 10 m²-Fläche (rechts und links: Funktürme).

ballon mit 450 m³ Volumen und 22 m Länge erteilen. Auf Grund der jahrelangen Erfahrungen bei der Konzeption und Realisierung aerologischer Messungen wurden dem AOL durch das **R**eichsamt **f**ür **W**etterdienst (RfW) die gesamte Betreuung für das seit Ende 1935 aus 7 Stationen (Lindenberg, Breslau, Leipzig, München, Frankfurt a. M., Köln, Hamburg) bestehende „synoptische" Registrierballonnetz übertragen. Das betraf insbesondere die Bereitstellung geeichter Radiosonden und die Auswertung aller Radiosondenmessungen (J. Reger).

Die Arbeiten der 1938 geschaffenen Radiosonden-Eichzentrale (J. Rink) erforderten zunehmend mehr Personal. Wurden 1939 noch 2.350 Eichungen vorgenommen, so stieg deren Anzahl bis 1944 auf etwa 30.000. Im Auftrag des RfW mussten häufig neben dem Routineprogramm Sonderaufstiege bei gefährlichen Wetterlagen (z. B. Nebel, tiefe Wolken, Vereisungsgefahr) auf kurzfristige Anforderung durchgeführt werden. So konnten bereits vor dem 2. Weltkrieg neben den technischen Arbeiten für Fesselaufstiege nur ausgewählte Forschungsthemen bearbeitet werden. Dazu gehörten:

- Untersuchungen über die raumzeitliche Böenstruktur mit einem Böenschreibernetz über einem Gebiet von 120 x 110 km² Ausdehnung (H. Koschmieder),
- Messungen zur repräsentativen Sichtweite für verschiedene Wetterlagen (L. Foitzik, H. Koschmieder),
- aerologische Messungen an raumfesten Punkten (Fixpunktmessungen nach P. Dubois).

Die Fixpunktmessungen entsprachen mehrfachen Forderungen aus der Forschung nach Informationen zum zeitlichen Verlauf meteorologischer Parameter an einen oder mehreren benachbarten Punkten in der freien Atmosphäre. Diese Fragestellung wurde 1937 für das AOL aktuell, als seitens der Luftfahrt Anfragen über Windvektorschwankungen in Entfernungsabständen, die Flugzeugdimensionen entsprachen, gestellt wurden. So wurde das Projekt „Fixpunktmessungen" (P. Dubois) am AOL gestartet. Dazu gehörte die Entwicklung und Erprobung einer speziellen Fesselballontechnologie (Abb. 1-14) und geeigneter Meteorographen (Abb. 1-15). Im Sommer 1938 konnten über eine Gesamtdauer von etwa 660 Stunden Fixpunktmessungen in der Grenzschicht in Höhen zwischen 300 und 1.000 m, 85 % davon in 500 m, durchgeführt werden. Abb. 1-16 zeigt den Temperatur- und Feuchteverlauf über etwa 7 Stunden an einem Fixpunkt in 500 m Höhe im Vergleich zur Bodenmessung. Man erkennt eine große Übereinstimmung in der Temperaturfeinstruktur, die durch Konvektionsvorgänge in der labilen sommerlichen Grenzschicht tagsüber verursacht wird.

Über die Ergebnisse dieser Messungen konnte noch auf der Tagung der Internationalen Aerologischen Kommission, die im Juni 1939 unter Vorsitz von

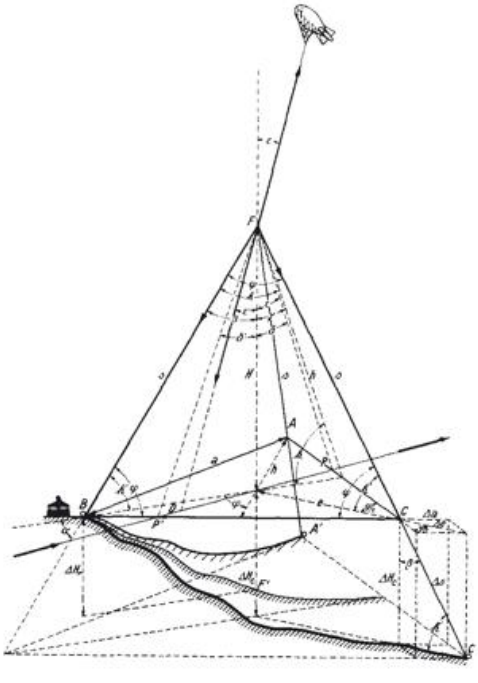


Abb. 1-14: Fixpunktpyramide nach P. Dubois, F: Fixpunkt.

Abb. 1-15: Fixpunkt-Meteorograph (rechts) vor dem Start (links Fesselballon).

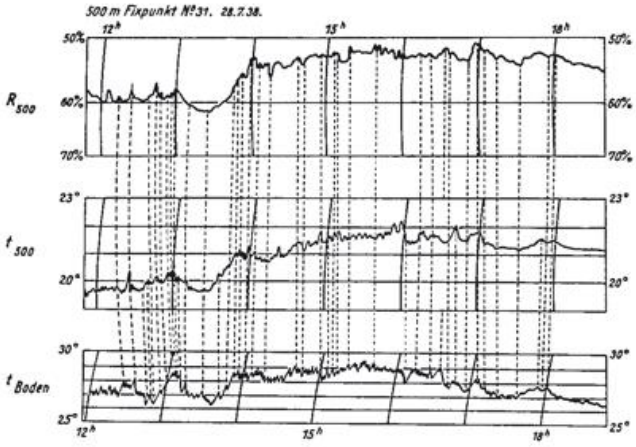


Abb. 1-16: Fixpunktregistrierung vom 28. Juli 1938, 12-19 Uhr. Temperatur in 500 m (Mitte) und am Boden (unten); Luftfeuchte in 500 m (oben).

L. Weickmann in Berlin stattfand, berichtet werden. Zu dieser Tagung waren nochmals Vertreter aus 20 Ländern in Europa, Amerika, Asien und Afrika nach Deutschland gekommen. Am 18. Juni 1939 fand auch eine Exkursion zum AOL statt. Mit Beginn des Krieges war das AOL zunehmend von der internationalen Wissenschaftskooperation ausgeschlossen.

Am 15. August 1939 wurde in Lindenberg für R. Aßmann als dem Pionier der Aerologie in Deutschland und Gründer des Observatoriums ein Gedenkstein eingeweiht. Der Stifter der Gedenkstätte war sein langjähriger Mitstreiter und Freund F. Schmidt-Ott.

Gegen seinen Willen musste H. Koschmieder am 1. Mai 1942 Lindenberg verlassen und F. Herath übernahm bis zum Kriegsende im April 1945 die Leitung des AOL. Der fortschreitende 2. Weltkrieg führte neben der Weiterführung und Intensivierung von technischen Aufgaben (z. B. Eichzentrale) zu einer deutlichen Beschränkung auf kriegsbedingte Arbeiten im Auftrage des RfW. Diese Untersuchungen betrafen vor allem folgende Probleme:

- Teststarts mit Radiosonden und Vergleichsmessungen mit Radiosonden und Drachen,
- Genauigkeitstest für Pilotsondierungen und Test für eine elektrische Höhenwindmessung (RADAR),
- Untersuchungen über den Zusammenhang zwischen UKW-Ausbreitung und Inversionsstrukturen,
- Entwicklung aerologischer Spezialsonden zur Wolkenidentifizierung (Ober-, Untergrenzen sowie Wolkenwassergehalt),
- angewandte Sichtweitenforschung und Reichweitenuntersuchungen für Scheinwerfer,
- Materialtests für Ballone.

Viele wissenschaftliche Projekte, die vor allem H. Koschmieder am Ende seiner Amtszeit noch formuliert hatte, mussten aktuellen Forderungen des RfW geopfert werden. Dazu gehörten Detailuntersuchungen von Inversionsstrukturen, photogrammetrische Wolkenmessungen und Untersuchungen der Strömungsverhältnisse bei großer Windscherung. So fanden die umfassenden technischen Erneuerungen und die moderne Ausstattung des AOL keinen angemessenen Niederschlag in wissenschaftlichen Aktivitäten, wie es von H. Koschmieder zu Beginn seiner Amtszeit konzipiert worden war. Viele Datensätze konnten erst nach Kriegsende wissenschaftlich ausgewertet werden (F. Herath, H. Koschmieder, L. Foitzik, P. Dubois). Bereits Ende 1943 setzten erste Auslagerungen von Material und Arbeitsplätzen ein. Vor allem ab Ende 1944 wurde damit und durch wachsenden Personalmangel die Arbeitsfähigkeit des AOL erheblich beeinträchtigt. Am 15. April 1945 flüchtete der Direktor zusammen mit dem Rest des verbliebenen wissenschaftlichen Personals vor der heranrückenden Front nach Süddeutschland. Am 26. April 1945 erfolgte die Besetzung des Observatoriums durch sowjetische Truppen.

3.3 Das Observatorium Lindenberg von 1945 bis 1950

Durch das umsichtige Verhalten der in Lindenberg verbliebenen technischen Kräfte wurden die Anlagen des AOL durch Kampfhandlungen zum Ende des Krieges nur relativ gering in Mitleidenschaft gezogen. Nach der Besetzung wurde das Observatorium einem bevollmächtigten sowjetischen Offizier, dem Ingenieur-Kapitän W. A. Belinski, der als Meteorologe dem Hydrometeorologischen Dienst der Roten Armee angehörte, unterstellt und die rasche Wiederaufnahme der fachlichen Arbeiten angewiesen. Dabei spielte auch der Ruf des Observatoriums bei sowjetischen Forschungseinrichtungen, der sich aus den Kontakten in den zwanziger und dreißiger Jahren zwischen Lindenberger Wissenschaftlern und Wissenschaftlern an aerologischen Einrichtungen in Russland gebildet hatte, sicherlich eine sehr nützliche Rolle. Die Wetter- und Klimabeobachtungen wurden nur für 5 Tage unterbrochen. Die wissenschaftlichen Arbeiten ruhten komplett bis Dezember 1945. Im Januar 1946 begannen erste Testaufstiege mit Pilotballonen sowie im Mai/Juni 1946 mit Drachen und Fesselballonen.

Auf Befehl der sowjetischen Besatzungsmacht vom 12. November 1945 wurden in ihrer Besatzungszone auf Landesebene Meteorologische Dienste aufgebaut, die vorerst vor allem für den Aufbau eines Beobachtungsnetzes und die Sicherung der Transportwege tätig sein mussten. Eine zentrale Leitung dafür wurde dem „Meteorologischen Zentralobservatorium Potsdam" übertragen, für dessen Direktorat sich der ehemalige Direktor R. Süring trotz seines hohen Alters erneut bereit erklärt hatte. R. Süring, der als weltweit bekannter Wissenschaftler das Vertrauen der sowjetischen Besatzungsmacht besaß, beauftragte P. Beelitz zum 1. Januar 1946 mit der Leitung des Observatoriums Lindenberg, als Teil des Landeswetterdienstes Brandenburg. Mitte 1947 wurde die Dienststelle dann in „Aerologisches Observatorium Lindenberg" (AOL) umbenannt, ein Name, der wie die vorherige Bezeichnung „Aeronautisches Observatorium Lindenberg" auch für mehr als 40 Jahre Gültigkeit haben sollte. Zentrale Aufgabe des AOL war die Betreuung der vier aerologischen **Ra**dio**so**ndenaufstiegsstellen (RASO) in der sowjetischen Besatzungszone, insbesondere die Versorgung mit dem erforderlichen Material wie Radiosonden und Ballonen. Die RASO-Station Lindenberg wurde am 01.07.1947 Bestandteil des operationellen aerologischen Netzes, verblieb aber beim AOL, während die Wetterstation Teil des Wetterdienst-Klimanetzes außerhalb des AOL wurde. Erst im April 1948 erhielt das Observatorium die formelle Erlaubnis der Landesregierung Brandenburg auf der Grundlage einer Entscheidung der Militäradministration zur Durchführung wissenschaftlicher Forschungsarbeiten.

Bei der Betreuung des Radiosondennetzes musste für die bewährte Lang-Radiosonde eine neue Produktionsstätte in Freiberg/Sa. geschaffen werden; es muss-

te die Eichzentrale in Lindenberg wieder in Betrieb gesetzt und erste Vorarbeiten zur Verbesserung der Sensorik und zur elektrischen Höhenwindbestimmung erledigt werden. Am 15. Oktober 1949 erhielt das AOL ein neues Gebäude für die Radiosondenaufstiegsstelle. Parallel zu diesen umfangreichen operationellen Aufgaben wurden erste Forschungsarbeiten zu folgenden Themen wieder aufgenommen:

- Technische Vorbereitungen für Fesselaufstiege, insbesondere für Fixpunktmessungen (P. Dubois),
- Aeroklimatologische Untersuchungen (P. Beelitz, M. Robitzsch),
- Sichtforschung (L. Foitzik),
- Explosionswellenausbreitung (P. Dubois).

Im Rahmen der Bildung des „Meteorologischen Dienstes der DDR" (MD) zum 1. Januar 1950 wurde der Radiosondendienst als selbständige Fachabteilung unter Leitung von P. Beelitz nach Berlin verlagert. Die Radiosondenaufstiegsstelle wurde aus dem AOL herausgelöst. Gleichzeitig wurde am 1. Januar 1950 M. Robitzsch, der früher langjährig in Lindenberg wirkte, als Direktor des AOL eingesetzt. Er verließ jedoch nach einer Berufung an die Universität Leipzig bereits im April Lindenberg und zum 1. Mai 1950 wechselte die Leitung an P. Dubois, der für etwa zwei Jahrzehnte als Direktor des AOL tätig war.

Neben Arbeiten zur Fesselaufstiegstechnik (P. Dubois), die jedoch durch die Sperrung des Luftraums seitens der Flugsicherheitsbehörden nicht ausreichend zum Tragen kommen konnten, und den Arbeiten zur Sichtforschung (L. Foitzik, G. Mücket) traten Fragen zur Entwicklung einer modernen Radiosonde (J. Rink) und neuer Verfahren zur elektrischen Höhenwindmessung durch (Radar, Radiotheodolit) stark in den Vordergrund (siehe folgender Abschnitt 4).

Im Gegensatz zu diesen technisch orientierten Arbeiten, die von der Leitung des MD neben der reinen Datensammlung dem AOL zugeteilt worden waren, wurde 1947 mit dem Aufbau einer speziellen mikroaerologischen Station und deren Betrieb über mehr als 5 Jahre die Möglichkeit geschaffen, durch eine gleichzeitige wissenschaftliche Interpretation (J. Rink) auch originelle Beiträge zur Atmosphärenforschung zu liefern. Die Station bestand aus einer Lift-Messanlage zwischen zwei Funkmasten und einem mikrometeorologischen Bodenmessfeld. An Seilaufzügen wurden mit empfindlichen Fixpunktmeteorographen und Dreikomponenten-Windschreibern die Profile von Druck, Temperatur, Feuchte und Wind zwischen Boden und etwa 80 m Höhe gemessen. Dieses Monitoring der bodennahen Grenzschicht war ein erster Vorläufer für die etwa 50 Jahre später am Observatorium begonnene neue Forschungsrichtung zur Untersuchung von Landoberflächen- und Grenzschichtprozessen (siehe Kapitel 6 in diesem Heft).

4 Das Aerologische Observatorium von 1950 bis 1969

4.1 Zur allgemeinen Situation

Nach Überwindung der schwierigen Nachkriegsjahre waren für die aerologische Forschung auf dem Gebiet der ehemaligen DDR neue Orientierungen notwendig geworden. Durch Qualitätsprobleme der Gummiballone bei den Routine-Radiosondierungen wurden nur noch mittlere Gipfelhöhen von 16 km erreicht. Damit lag man weit hinter den Ergebnissen der Vorkriegszeit. Neben den Wünschen nach einer Verbesserung dieses Zustandes wurden an das AOL immer wieder Fragen gerichtet, die mit dem gerade entstehenden Luftverkehr in der DDR im Zusammenhang standen. Vor allem die militärische Luftfahrt wollte über Kenntnisse der meteorologischen Einsatzbedingungen von Düsenflugzeugen verfügen. Eine Analyse der anstehenden Fragen ergab einen Forschungsbedarf, der sowohl die Grenzschicht als auch die obere Troposphäre und untere Stratosphäre betraf.

Da die vom Meteorologischen Dienst (MD) bereitgestellten Finanzmittel in den fünfziger Jahren noch sehr begrenzt waren, ging das Observatorium eine langjährige Vertragsforschung mit dem **M**inisterium für **N**ationale **V**erteidigung (MNV) ein. Dies hatte in der Zukunft einige Konsequenzen. Durch die besonderen Geheimhaltungsbedingungen waren sowohl die interne wissenschaftliche Kommunikation als auch die Zahl der Veröffentlichungen des Observatoriums eingeschränkt. Die Verlagerung der Radiosondenhauptstelle von Lindenberg nach Berlin-Rummelsburg im Jahre 1950 und die fachliche Unterstellung der aerologischen Station Lindenberg unter diese Zentralstelle hatte überdies eine Trennung der aerologischen Forschung vom praktischen Radiosondendienst zur Folge. Damit wurde das Zusammenwirken beider Einrichtungen in diesem Zeitraum auf technische Fragen reduziert, wie z. B. die Ausrüstung des Radiosondendienstes mit den am AOL entwickelten und dann in Kleinserie hergestellten Radiotheodoliten.

4.2 Entwicklung und Anwendung der Fesselballonsondierung

Nach seiner Amtsübernahme als Direktor des AOL im Jahr 1950 hat P. Dubois (1903–1994) die Entwicklung und den Bau von großen Fesselballonen mit einem Volumen von 26 m^3 aus Perfol eingeleitet, mit denen man Höhen bis 3 km erreichen konnte (DUBOIS 1957/1993). Später hat DUBOIS (1959) die wissenschaftlichen Zielsetzungen für die Anwendung der Fesselballonsondierung skizziert. Abgesehen von einzelnen Erprobungsarbeiten scheiterte die praktische Anwendung an der fehlenden Genehmigung für ein Luftsperrgebiet über Lindenberg.

Zur Klärung atmosphärischer Bedingungen beim Start von Düsenflugzeugen schlug das MNV die Durchführung von Fesselballonsondierungen außerhalb des AOL vor. Überdies wurde mit dem Bau eines Atomkraftwerkes in der Umgebung von Rheinsberg an den MD im Jahre 1959 die Frage der Ausbreitung von Luftschadstoffen herangetragen, deren Bearbeitung in den Folgejahren durch mehrere Dienststellen des MD erfolgte: **M**eteorologisches **H**aupt**o**bservatorium Potsdam (MHO), AOL, Observatorium Dresden-Wahnsdorf und Hauptamt für Klimatologie Potsdam. Die Leitung dieses Forschungsprojektes hatte K. H. Grasnick (1916–2000) vom MHO. Das AOL erhielt den Auftrag, für die beiden vorgenannten Forschungsaufgaben einen aerologischen Aufstiegs- und Messzug zu entwickeln, der es gestattete, den meteorologischen Zustand in der Grenzschicht der Atmosphäre an beliebigen Standorten zu messen. Der am AOL dafür aufgebaute Messzug bestand aus Messgerätetransportwagen, Motorwinde, Wasserstoffflaschenanhänger und Benzin-Stromaggregat (Abb. 1-17). Als Geräteträger wurden Fesselballone mit einem Füllvolumen von 26, 50 und 100 m³ entwickelt und eingesetzt (Abb. 1-18). Damit führte das Observatorium im Zeitraum von 1960 bis 1965 bei Cottbus, Königs-Wusterhausen, Müncheberg und Rheinsberg Grenzschichtmessungen durch. Schwerpunkte des Programms waren Messungen von Temperatur, Windgeschwindigkeit und -richtung sowie Aerosol. Für die Temperaturmessung entwickelte J. Rink ausgehend von dem Aßmann'schen Aspirations-Psychrometer ein Halbleiter-Psychrometer zur Messung der trockenen und feuchten Temperatur (Abb. 1-19). Zur Bestimmung des Windes wurde unter dem Fesselballon eine sogenannte Pilot-Ballon-Startvorrichtung angeordnet, von der nacheinander durch Kommandoauslösung fünf kleine Ballone gestartet werden konnten (Abb. 1-18). Aus der Zugrichtung dieser Ballone erfolgte dann die Windbestimmung mittels eines optischen Theodoliten. Alternativ wurde die Windbestimmung auch durch Anordnung eines Tripelspiegels in einem ortsstabilisierenden Tonkinring mittels Radar oder auch mit einem von J. Rink entwickelten Windmesser auf Thermistorbasis vorgenommen. Zur Aerosolbestimmung diente ein Aerosolsammler, der unterhalb des Fesselballons montiert und über einen Spezialschlauch mit einer Ansaugpumpe am Boden verbunden war.

Abb. 1-19: Rink'sches Halbleiter-Aspirations-Psychrometer für den Einsatz zur Grenzschichtsondierung (links) und als Stationsgerät.

Abb. 1-17: Aerologischer Aufstiegs- und Messzug zur Untersuchung der Grenzschicht bei der Vorbereitung von Messungen in der Nähe von Cottbus (P. Dubois in Bildmitte).

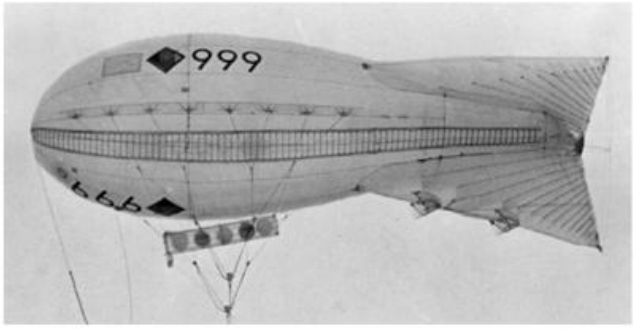


Abb. 1-18: Fesselballon mit einem Füllvolumen von 50 m³ und einer Startvorrichtung für fünf Pilotballone zur Bestimmung des Windes.

4.3 Schichtflüge in der Stratosphäre mit Driftballonen

Zur Erzielung größerer Aufstiegshöhen bis über 30 km mit speziellen aerologischen Messsystemen wurde im Zeitraum 1958–68 von DUBOIS (1967) die Methode der aerologischen Sondierung mit Driftballonen aus Polyäthylen als aerologisches Messverfahren entwickelt. Zur Vermeidung des Platzens waren diese Driftballone mit einem Gasauslassventil und einer Umkehrvorrichtung ausgerüstet. Nach dem Aufstieg drifteten diese Ballone in einer bestimmten vorgegebenen Höhe der Atmosphäre (Abb. 1-20, Teilbild 1), so dass

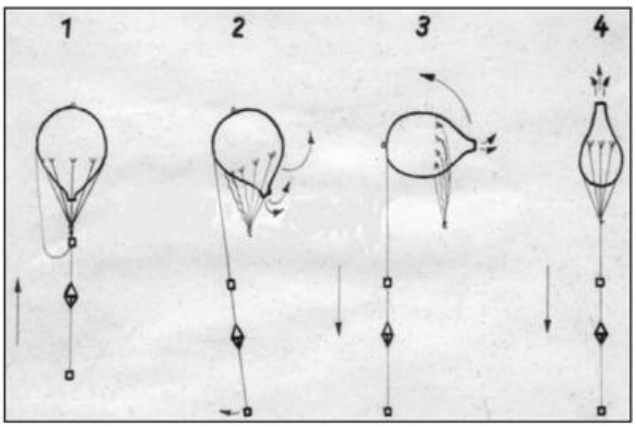


Abb. 1-20: Betriebsphasen eines Driftballonfluges: Aufstieg und Drift in einer Höhenschicht (1), Kippphasen (2, 3) und Abstieg des Ballons (4).

die mitgeführten Instrumente in dieser Drifthöhe beliebig lange Informationen aufzeichnen konnten. Als eine militärische Anwendung dieser Driftballone war die Erkundung über feindlichem Gebiet vorgesehen. Die Driftphase des Plastballons konnte zeitgesteuert durch ein Uhrwerk oder auch funkferngesteuert beendet werden, indem das am oberen Pol des Ballons befestigte Halteseil für die Instrumente von der Ballonunterseite ausgeklinkt und damit ein Umkippen des Ballons (Teilbilder 2 und 3 der Abb. 1-20), das Herausströmen des Wasserstoffs aus dem Gasauslassventil und damit der Abstieg des Ballons erreicht wurde (Teilbild 4 der Abb. 1-20).

Es wurden Plastballone in den Größen von 100 m³ für die Vorerprobung sowie 1.029 m³ und 6.370 m³ für die späteren Flugerprobungen entwickelt. Die Fertigung dieser überdimensionalen Ballone fand in der Ballonwerft des AOL mit speziell entwickelten Vorrichtungen zur Ballonherstellung statt. So konnten 1965 jeweils 8 der beiden größeren Ballontypen erfolgreich gestartet werden (Abb. 1-21).

Abb. 1-21: Start eines Driftballons mit einem Volumen von 6.370 m³.

Für die Durchführung von Sondierungen mit Driftballonen forderte die Flugsicherung eine zeitnahe Auswertung von Flughöhe und Standort, deren Bestimmung mit dem 3,2 cm Höhenwindradar erfolgte. Vom AOL wurde dazu ein spezieller Höhenwindradarcomputer mit einem Flugbahnzeichner von 3 m Durchmesser und einem Zeichengerät für die Zeithöhenkurve entwickelt und erprobt, so dass der Flugsicherung in jeder Flugphase die genaue Position des Driftballons übermittelt werden konnte.

Bedingt durch die beabsichtigte militärische Anwendung der Driftballontechnologie mangelte es bei den Erprobungen der Großplastballone an einem aerologischen Forschungsprogramm mit speziellen Instrumentierungen. So wurden lediglich Wind- und Temperaturmessungen durchgeführt. Der zunehmende Flugverkehr am Ende der sechziger Jahre ließ schließlich eine weitere Verfolgung dieser aerologischen Forschungsmethode nicht mehr zu.

4.4 Radiosonden und radarmeteorologische Verfahrenserprobungen

Bereits zu Beginn der fünfziger Jahre wurden Arbeiten initiiert, um die gleichzeitige Übertragung meteorologischer Messgrößen aus der freien Atmosphäre durch eine Mehrkanal-Radiosonde zu realisieren (Abb. 1-22 links, aus: DUBOIS 1957/1993). Bedingt durch personelle Fluktuationen leitender wissenschaftlich-technischer Bearbeiter war dieser Entwicklung kein Erfolg beschieden. So kam bei den Schichtflügen mit den Großplastballonen lediglich eine Einkanal-Radiosonde (EKRS-64/70) zur Temperaturmessung zum Einsatz (Abb. 1-22 rechts), die für die Erprobungen in einer Kleinserie von etwa 200 Stück hergestellt wurde. Im Gegensatz zur Elektronik der Mehrkanal-Radiosonde ist die Entwicklung der Sensoren für eine neue elektrische Radiosonde von J. Rink kontinuierlich und zielstrebig betrieben worden, indem er die Anwendung des Thermistors in der Meteorologie grundsätzlich untersuchte (RINK 1961, 1970). Auch zu den Druck- und Feuchtesensoren sind entsprechende Betrachtungen durchgeführt worden. Angesichts der in der Zwischenzeit im Routine-Radiosondendienst erreichten Sondierungshöhen um 30 km war es notwendig geworden, die unbefriedigende Messgenauigkeit der Sensoren im Höhenbereich oberhalb 15 km zu bestimmen (RINK 1964).

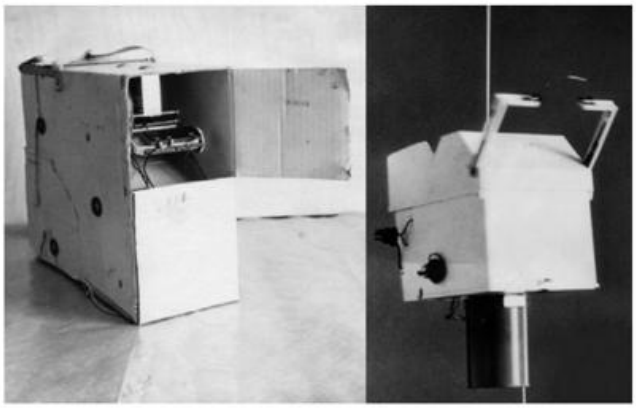


Abb. 1-22: Elektronische Mehrkanalsonde (links) und in Kleinserienproduktion gefertigte Einkanal-Radiosonde EKRS-64/70 (rechts).

Auch für die meteorologische Anwendung der Radartechnik legte RINK (1962) eine umfassende Studie vor. Im Vorfeld dieser Studie war vom Wissenschaftlich-Technischen Büro für Gerätebau Berlin ein 3,2 cm Höhenwindradar entwickelt und 1957 für die Bahnverfolgung von Ballonen dem Observatorium übergeben worden. Erprobungen zeigten, dass dieses Radar relativ störanfällig war und die Reichweite überdies unter 50 km lag. Durch umfangreiche Weiterentwicklungen am Observatorium sind diese Mängel beseitigt worden, so dass schließlich Reichweiten bis 150 km erreicht wurden. Damit stand für die Schichtflüge mittels Driftballonen ein leistungsfähiges Gerät für deren Bahnverfolgung zur Verfügung.

Parallel zur externen Entwicklung des Höhenwindradars wurden am Observatorium für die Teilnahme an den Experimenten zum Internationalen Geophysikalischen Jahr 1957/58 eigene Entwicklungsarbeiten für einen Radiotheodoliten zur Bahnverfolgung von Radiosonden durchgeführt. Die Erprobungen des Radiotheodoliten RT-70 (Abb. 1-23) mit einer Wellenlänge von 70 cm verliefen so erfolgreich, dass schließlich alle Radiosondenaufstiegsstellen des MD damit ausgerüstet wurden. Mit der Umstellung der Wellenlänge des Radiosondensenders von 70 cm auf 17 cm erfolgte am AOL später eine Weiterentwicklung des Radiotheodoliten (RT-17) und eine Ausrüstung aller Radiosondenaufstiegsstellen des aerologischen Netzes auch mit diesen neuen Systemen.

Abb. 1-23: Radiotheodolit RT-70 mit Parabolspiegel und rotierender Wendelantenne für die Radiosondierung.

4.5 Sichtforschung

Der 1951 erfolgte Wechsel von L. Foitzik (1907–1981) vom AOL zur **A**kademie **d**er **W**issenschaften (AdW) nach Berlin hatte eine Schwächung der Arbeitsgruppe Sichtforschung zur Folge, die nun nur noch aus zwei Mitarbeitern bestand. Trotzdem wurden für die damalige Zeit beachtenswerte Entwicklungen von Sichtmessgeräten für den operationellen Einsatz geleistet. Ausgehend von den Arbeiten Foitziks entwickelte G. Mücket (1920–1999) ein registrierendes Transmissometer (MÜCKET 1956), das später von den Freiberger Werkstätten für Elektromechanik gefertigt und an Flughäfen und im Messnetz des MD eingesetzt wurde. Des Weiteren wurde ein Rückstreu-Lichtschreiber entwickelt, das später vom VEB Gerätebau Dresden in Kleinserie hergestellt und an den Küstenstationen zur Nebelwarnung routinemäßig eingesetzt wurde. MÜCKET (1969) hat seine Erkenntnisse bei der Entwicklung dieser Geräte später in einer wissenschaftlichen Arbeit zur spektralen Extinktion des Lichts in der bodennahen Atmosphäre zusammengefasst. Mit dem Wechsel von G. Mücket zum Observatorium Potsdam sind die Arbeiten zur Sichtforschung am AOL 1968 eingestellt worden.

5. Das Aerologische Observatorium 1969 bis 1990

5.1 Zur allgemeinen Situation

Im Rahmen der Vertragsforschung für das MNV wurde von P. Dubois bereits der Vorschlag zur Entwicklung eines meteorologischen Raketensondierungssystems skizziert. Reale Chancen, ein derartiges Programm umzusetzen, entstanden 1967, als von russischer Seite das Interkosmosprogramm der sozialistischen Länder zur Erforschung und Nutzung des Weltraumes für friedliche Zwecke ins Leben gerufen wurde, in dem sich auch eine Arbeitsgruppe für Kosmische Meteorologie etablierte. Im Rahmen dieser Arbeitsgruppe war die gemeinschaftliche Entwicklung eines Raketensondierungsprogramms für den Höhenbereich zwischen 40 und 80 km vorgesehen. Erste vorbereitende Arbeiten für eine Sondierung mit meteorologischen Raketen wurden noch unter der Leitung von P. Dubois in Zusammenarbeit mit dem MNV durchgeführt.

Der damalige Generalsekretär der AdW der DDR, Ernst-August Lauter, der Gründer und Leiter des Observatoriums für Ionosphärenforschung Kühlungsborn sowie Direktor des Heinrich Hertz-Instituts der AdW in Berlin war und eine ganze Generation von Wissenschaftlern auf dem Gebiet der Hochatmosphärenforschung geprägt und gefördert hat, motivierte die Beteiligung des MD an der Raketensondierung mit den zu erwartenden Verbesserungen der Wettervorhersage als Ergebnis der geplanten Untersuchung von Wechselwirkungen zwischen Mesosphäre und Stratosphäre. Für die Durchführung des Projektes schlug er das AOL und als dessen neuen Direktor den aus seiner Kühlungsborner Schule stammenden Peter Glöde (1930–2002) vor. Ab 1969 wirkte P. Glöde als Direktor des AOL, nachdem P. Dubois aus Altersgründen die Leitung des Observatoriums abgegeben hatte. Entsprechend den ursprünglichen Plänen sollte die Entwicklung der Raketensondierung bereits 1978 mit einer internationalen Prüfung des Messsystems abgeschlossen werden. Die bei der internationalen Zusammenarbeit zur Entwicklung des Raketensondierungssystems auftretenden Schwierigkeiten führten allerdings zu großen Zeitverzögerungen.

1978 wurde ein Regierungsabkommen zwischen der DDR und der UdSSR abgeschlossen, in dem der Aufbau der Raketenstation Zingst, die kostenlose Lieferung meteorologischer Raketen und Bodenausrüstungen durch die russische Seite und die Lieferung von jährlich 425 der am AOL entwickelten und vom Werk für Fernsehelektronik (WF) in Serie hergestellten Raketensonden durch den MD vereinbart wurde. Als erster Starttermin einer Rakete an der Station Zingst war 1980 vereinbart worden. Mängel, die aus der Unzuverlässigkeit der russischen Trägerrakete MMR 06 M resultierten, hatten zur Folge, dass die erste Raketensondierung an der Station Zingst erst 1988 erfolgte. Von 1982 bis 1990 existierte die Raketensondierungsstation Zingst als Außenstelle des AOL (Leiter: H. Gernandt).

Von der Leitung des MD wurden 1984 die aus einer Trennung von Radiosondendienst und aerologischer Forschung resultierenden Nachteile erkannt und die Radiosondenaufstiegsstelle Lindenberg und die synoptische Station nach etwa 35-jähriger Trennung dem AOL wieder als eine Arbeitsgruppe zugeordnet. 1986 erfolgte auch die Einordnung des früher eigenständigen **Z**entralen **R**adiosonden**d**ienstes des MD (ZRSD) als Arbeitsgruppe innerhalb der Abteilung Aerologie (Leiter: U. Leiterer). Damit existierte die ZRSD in Berlin-Rummelsburg bis 1990 als zweite Außenstelle des AOL.

Während der Amtszeit von P. Glöde von 1969 bis 1990 waren die Arbeiten zur Hochatmosphäre der fachliche Schwerpunkt des AOL. Dagegen konnten aerologische Forschungsarbeiten und andere Entwicklungen, wie Automatisierung des Radiosondendienstes, Satellitenmeteorologie, Antarktisforschung, Ozonforschung und bodengebundene Fernerkundung nur mit wesentlich geringerer Kapazität und teilweise nur in Kooperation mit anderen Einrichtungen betrieben werden. Bei der Zusammenarbeit des AOL mit anderen Forschungseinrichtungen des MD und verschiedenen Instituten der AdW wurden die technisch leistungsfähigen Werkstätten und Laboratorien des AOL von den Kooperationspartnern vielfach in Anspruch genommen. Jedoch waren die Mitarbeiter des AOL bei der wissenschaftlichen Interpretation und den Publikationen nur in geringem Maße beteiligt.

5.2 Sondierung der Hochatmosphäre mittels meteorologischer Raketen

Die wissenschaftliche Zielsetzung der Arbeiten zur Raketensondierung war die Erforschung der Wechselwirkung zwischen Stratosphäre und Mesosphäre und deren Auswirkungen auf das Wettergeschehen. Dazu erschien die Raketensondierung nach dem Dart-Prinzip (Abb. 1-24) als eine zweckmäßige Messmethode, weil der interessierende Höhenbereich zwischen 40 und 80 km weder mit Radiosonden noch mit den klassischen Methoden der Mesosphärenforschung zugänglich war. In den ersten Jahren des Bestehens des Interkosmosprogramms entwickelten alle beteiligten Länder eigene Raketensondierungssysteme. So wurden auch vom AOL Entwicklungen zu den drei Systemkomponenten Trägerrakete, Raketensonde und Fallschirm aufgenommen. Von Beginn an bestand die Zielsetzung aller Arbeiten in der regelmäßigen wöchentlichen Sondierung mit einem Raketensystem an der Station Zingst als Bestandteil eines internationalen Raketenmessnetzes (Russland, Polen, Rumänien). Die notwendigen Raketenerprobungen wurden hauptsächlich in Kapustin Jar bei Wolgograd (Russland) und in Łeba [Leba] (Polen) durchgeführt. Bedingt durch die Schwierigkeiten bei der internationalen Kooperation konnte erst 1988 mit den routinemäßigen Raketensondierungen in Zingst begonnen werden (GLÖDE und GERNANDT 1988).

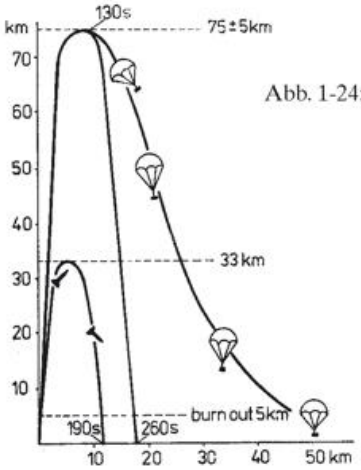


Abb. 1-24: Betriebsphasen der Raketensondierung: die Trägerrakete MMR 06 M erreichte nach etwa 5 s eine Höhe bei 5 km. In dieser Phase löste sich der pfeilförmige Kopfteil und flog etwa 130 s bis in eine Höhe um 75 km. Dort wurde die Messsonde mit einem Fallschirm ausgestoßen. In der Phase des Absinkens erfolgte die Messung von Wind und Temperatur.

Die Entwicklung der Trägerrakete führten H. Markgraf, U. Leiterer und M. Weller von 1969 bis 1973 durch (MARKGRAF et al. 1976). Ihnen gelang in kurzer Zeit die Entwicklung eines geeigneten Treibstoffs für die Trägerrakete. Diese Arbeiten mussten allerdings 1973 eingestellt werden, da von russischer Seite die Raketenentwicklung in der DDR skeptisch beurteilt wurde. Offiziell wurde argumentiert, dass man bereits über eine gut funktionierende Trägerrakete MMR 06 verfüge, die nur noch auf das in Zingst geforderte kleinere Einsatzgebiet angepasst werden müsse. Tatsächlich zeigten dann die Flugerprobungen in den ersten Jahren dass die modifizierte Trägerrakete MMR 06 M erhebliche Mängel hatte, so dass die gewünschten Flugeigenschaften nicht zuverlässig realisiert wurden. Erst ab 1978 erreichte man bei den jährlichen Erprobungen in Wolgograd erste Fortschritte.

Die Entwicklung des Fallschirms erfolgte bis 1978 unter Leitung von P. Dubois und später H. Gernandt als Leiter der Arbeitsgruppe Ballonwerft. Der Fallschirm, gleich welcher Bauart, war ein ständiges Sorgenkind bei den langjährigen Flugerprobungen. Oftmals öffnete er sich nach dem Ausstoß im Gipfelpunkt nicht, so dass die Messsonde ungebremst herabfiel. Erst nachdem der Fallschirm nach dem Ausstoß durch einen sich selbst aufblasenden ringförmigen Schlauch wie ein Reifrock stabilisiert wurde, trat eine entscheidende Verbesserung ein. Diese Entwicklungsarbeiten des AOL zum Fallschirm wurden von russischer Seite später übernommen und dort in Serienproduktion überführt. Neben den Arbeiten am Fallschirm wurde vom AOL eine auf 1,5 Meter Durchmesser aufblasbare Kugel aus dünner (12 µm) Mylarfolie für die in der Sowjetunion bereits routinemäßig eingesetzte meteorologische Rakete M 100 entwickelt und erprobt. Diese Rakete erreichte eine Höhe von 95 km, wo diese Kugel ausgestoßen wurde. Sie sank dann langsam zur Erde herab. Dabei wurde die Abdrift als Wind interpretiert und die Sinkgeschwindigkeit zur Berechnung der Luftdichte herangezogen. Ein Start dieser Rakete an der Station Zingst war wegen des erforderlichen ho-

hen Sicherheitsgebiets nicht möglich. Deshalb wurden die Entwicklungsergebnisse 1979 an die russische Seite übergeben, die für den Routineeinsatz der M 100 im Messnetz eine Serienproduktion dieser fallenden Kugel vornahm. Die am AOL unter Leitung von P. Dubois in den siebziger Jahren entwickelte Methode der fallenden Kugeln wird bis heute international als eines der Standardverfahren zur Bestimmung von Dichte- bzw. Temperaturprofilen bei hochatmosphärischen Sondierungen eingesetzt (LÜBKEN 2005).

Der Schwerpunkt des deutschen Beitrages zum Raketensondierungsprogramm wurde durch die Entwicklung der Raketensonde MRS 3000 (3010, 3020) geleistet, die später vom WF Berlin serienmäßig produziert wurde. Die Entwicklung dieser Sonde wurde von K.-H. Schulz und R. Stolte (SCHULZ und STOLTE 1979) bearbeitet. Dabei sind im Verlauf der Entwicklung verschiedene einschneidende Veränderungen vorgenommen worden (Abb. 1-25). Dies betraf beispielsweise den Übergang vom Kunststoff- zu einem Stahldart, den die russische Seite zur Verbesserung der Flugeigenschaften von Rakete und Dart vorschlug. Die Funktion des kleinen Antwortsenders musste nun sowohl innerhalb des elektronisch abgeschirmten Stahldarts als auch nach dem Ausstoß gesichert werden. Ab 1979 sind erste Erprobungsmuster der Raketensonde MRS 3000 vom WF für die Flugerprobungen bereitgestellt worden.

Der Auswahl der Sensoren für die Raketenmesssonde waren umfangreiche theoretische Betrachtungen von J. Rink und E. Asseng vorausgegangen. Nach einer generellen Studie zum Einsatz von Halbleitern zur Temperaturmessung in der Hochatmosphäre (RINK 1974), wurden sowohl die Trägheitsfehler als auch der Wärmeaustausch zwischen Thermistoren und verdünnter Luft theoretisch untersucht (ASSENG 1975, 1982). Dennoch musste man später bei den Flugerprobungen feststellen, dass der gemessene Temperaturverlauf unrealistisch war. Zur Klärung der Ursache waren umfassende wärmephysikalische Untersuchungen der Thermistoren notwendig, die zu Modifikationen sowohl der Thermistorkoeffizienten als auch der Thermistorhalterung führten. Die konstruktiven Änderungen und der Wunsch nach einer erhöhten Anzahl nutzbarer Telemetriekanäle führten 1984 zur Entwicklung einer verbesserten Raketensonde MRS 3010. Parallel dazu wurde am AOL ein Messwerterfassungs- und -verarbeitungssystem für Raketensondierungsdaten AES-R entwickelt (K.-H. Schulz). Der erste Start einer meteorologischen Rakete an der Station Zingst erfolgte schließlich am 21. Oktober 1988 (Abb. 1-26). Bis Ende 1990 wurden insgesamt 43 Raketensondierungen durchgeführt.

Abb. 1-25: Verschiedene Entwicklungsmuster der Raketensonde MRS nach den Entwicklungsetappen aufgestellt (von links nach rechts); vorn liegend Prototyp der MRS 3000, davor verschiedene Ausführungen der Sensorhalterung. Foto: R. Stolte, AOL.

Abb. 1-26: Start der ersten meteorologischen Rakete MMR 06 M an der Forschungsstation Zingst am 21. Oktober 1988; Foto: R. Stolte, AOL.

Da der DWD die Arbeiten des AOL zur Hochatmosphäre nicht weiterführte, wurden 1992 weitere 19 Raketensondierungen durch das Institut für Atmosphärenforschung Kühlungsborn im Rahmen eines Forschungsprojektes vorgenommen und mit den parallel durchgeführten Radarmessungen von Juliusruh, Kühlungsborn, Bad Lauterberg und Collm sowie Satellitenmessungen ausgewertet. Von den insgesamt 62 in Zingst durchgeführten Raketensondierung erhielt man bedingt durch nicht funktionierende Fallschirme und nicht erfolgte Trennung des Darts von der Antriebsrakete nur in 55 % aller Fälle auswertbare Daten, d. h., dass die von Beginn an vorhandene Unzuverlässigkeit von Trägerrakete und Fallschirm von russischer Seite nicht wesentlich verbessert werden konnte.

5.3 Automatische Verarbeitung von Radiosondendaten

Die automatische Verarbeitung von Raketensondierungsdaten sollte ursprünglich bereits 1976 am AOL in Angriff genommen werden. Durch die o. a. Verzögerungen bei der Raketensondierung entstand die Vorstellung, zunächst Erfahrungen durch eine Anwendung im Radiosondendienst zu gewinnen, da die von der ZRSD diesbezüglich unternommenen Arbeiten nicht zum Ziele geführt hatten. Als ein erster Schritt zur automatischen Radiosondenauswertung wurde von STEINHAGEN (1981) ein automatisches Erfassungssystem AES-1 entwickelt und an der Radiosondenaufstiegsstelle Lindenberg erprobt. Parallel entwickelten ASSENG (1980) und H. Dier das Programm RASOAU zur automatischen Auswertung der mit dem AES-1 digitalisierten Daten. Bis 1980 wurden auch die Radiosondenaufstiegsstellen Greifswald und Meiningen mit den am AOL in Kleinserie hergestellten AES-1 ausgerüstet. Die digitalisierten Radiosondendaten wurden dabei per Telex zum Rechenzentrum des MD nach Potsdam übertragen, wo die zentrale Auswertung aller Radiosondendaten erfolgte. Mit der Ent-

wicklung der Mikrorechentechnik entstand der Wunsch, die langwierige und umständliche Telex-Übertragung der Radiosondendaten in das Potsdamer Rechenzentrum zu umgehen und die Verarbeitung der Radiosondendaten unmittelbar an den Radiosondenstationen auszuführen. Für diese Lösung wurde von H. Dier ein neues Auswerteprogramm in der Maschinensprache und von H. Steinhagen ein mikroprozessorgesteuertes Erfassungs- und Verarbeitungssystem AES-2 entwickelt und an allen Radiosondenaufstiegsstellen in die Praxis eingeführt (STEINHAGEN und DIER 1991). Damit war das AOL wieder näher an den praktischen Radiosondendienst herangerückt. Jedoch wurden weitergehende Entwicklungen für den Radiosondendienst, wie die von STEINHAGEN (1986) entworfene Idee einer digitalen Radiosonde, nicht weiterverfolgt. Dahingegen sind die technischen Kapazitäten des AOL seit 1988 auf die Rekonstruktion der veralteten russischen Meteoritstationen (Bodenempfangsstationen des Radiosondendienstes) orientiert worden, wobei jedoch keine verlässlichen Informationen über die Weiterentwicklungen der an den aerologischen Stationen eingesetzten russischen Radiosonden vorlagen.

5.4 Wettersatellitenempfangstechnik

P. Glöde hat 1970 den Wettersatellitenempfang als ein neues Arbeitsgebiet am AOL eingeführt. Dabei wurde vom **E**lektro-**A**kustischen **L**abor Berlin (EAL) in Zusammenarbeit von AdW und AOL die **W**etterbild-**E**mpfangs**s**tation WES-1 entwickelt. EAL baute für den Frequenzbereich 137 MHz eine Wendelantenne (Abb. 1-27) einschließlich Steuerung und die AdW stellte den Empfänger APT 137/3 bereit. Aufgabe des AOL war die Zusammenführung und Erprobung aller Komponenten. Zur Aufzeichnung von Wetterbildern wurde vom AOL der russische Bildschreiber Newa an die verschiedenen Satellitennormen angepasst und in das WES-1 integriert. In den nachfolgenden Jahren wurden Anlagen dieses Typs im Rahmen des Hilfsfonds der WMO in Damaskus (1971), Khartum (1972), Havanna (1974), Prag (1977) und DaNang (1979) von Mitarbeitern des AOL aufgebaut. Dabei mussten diese Anlagen auch gewartet werden und erforderten eine laufende technische Betreuung.

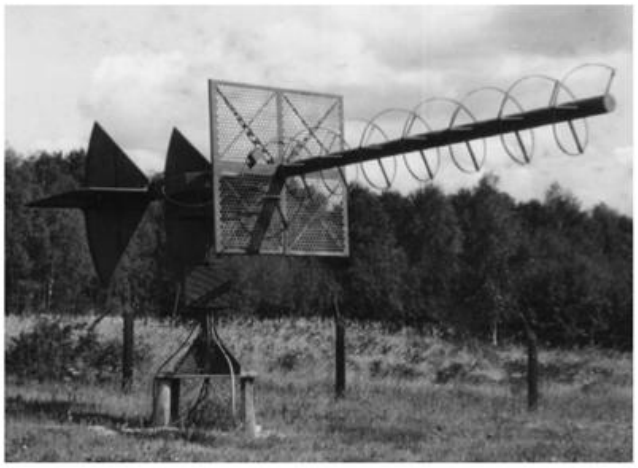


Abb. 1-27: Wettersatellitenempfangsanlage (WES-1) für analoge Wetterbilder polumlaufender amerikanischer und russischer Satelliten mit Wendelantenne.

Nach der Entwicklung der Wetterbild-Empfangsstation WES-2 durch das **Z**entrum für **W**issenschaftlichen **G**erätebau (ZWG) der AdW war bereits 1974 die Weiterentwicklung einer WES-3 für den Empfang geostationärer Wettersatelliten geplant, die an der Verfügbarkeit ausreichend empfindlicher Empfangsbaugruppen scheiterte. Der von der **Z**entralen **W**etter**d**ienststelle (ZWD) in Potsdam geforderte Empfang von APT-Wetterbildern des geostationären Satelliten METEOSAT zur Verbesserung der Kurzfristvorhersage führte schließlich 1976 in eine Kooperation des damaligen Instituts für Elektronik der AdW (später Institut für Kosmosforschung), des Lehrstuhls für Mikrowellentechnik der Technischen Universität Budapest und des AOL zur Entwicklung einer SDUS-Empfangsanlage. Die TU Budapest entwickelte den im Fokus der Parabolantenne angeordneten Antennenverstärker und Konverter, da die ungarische Seite Zugang zu den benötigten Hochfrequenzbauelementen aus dem westlichen Ausland hatte. Am AOL wurde unter Leitung von H. Steinhagen die Antennenanlage entwickelt und das gesamte System an der ZWD in Potsdam aufgebaut (Abb. 1-28). In einer außerordentlich kurzen Entwicklungszeit von zwei Jahren konnte am 23. Mai 1978, noch bevor der DWD seine erste SDUS-Anlage in Betrieb nahm, das erste Satellitenbild von dem nur wenige Wochen zuvor gestarteten westeuropäischen Wettersatelliten METEOSAT empfangen wurde. Nur fünf Monate später, am 13. Oktober 1978, wurde diese Anlage zur operationellen Nutzung an die ZWD in Potsdam übergeben. Mit dem Empfang und der Auswertung von Wetterbildern im Zeitabstand von 30 Minuten konnten die Kurzfristprognosen der ZWD wesentlich verbessert werden.

Dieser Erfolg führte zur Entwicklung eines Systems Digisat für den Empfang, die Verarbeitung und Präsentation **digi**taler Wetter**sat**ellitenbildinformationen von geostationären und polnah umlaufenden Satelliten. Die Leitung des Gesamtprojektes wurde 1983 vom

Abb. 1-28: Antenne zum Empfang von digitalen Signalen des geostationären Wettersatelliten Meteosat und polumlaufender Satelliten der amerikanischen Wettersatelliten der Serie TIROS-N auf dem Dach der Zentralen Wetterdienststelle Potsdam; Foto: Wetteramt Potsdam, DWD.

AOL zur ZWD verlagert, da mit der Einführung dieses Systems einschneidende Veränderungen der Arbeitsweise bei der Wetteranalyse und -prognose verbunden waren. Das AOL war von diesem Zeitpunkt an nur noch für den Empfangskomplex mit der Antenne verantwortlich. Die Leitung des MD beschloss vor Abschluss der Entwicklung ein System Digisat an Nordkorea zu liefern. Dies hatte eine Verzögerung des operationellen Einsatzes bei der ZWD in Potsdam bis Mitte 1989 zur Folge. Eine wissenschaftliche Bearbeitung von Satelliteninformationen am AOL wurde seitens der Leitung des MD nicht befürwortet, da diese durch MHO und ZWD vorgesehen war. Aus diesem Grund blieben auch die Arbeiten des AOL zum Wettersatellitenempfang auf den technischen Bereich beschränkt (s. Abschnitt 5.1).

5.5 Beteiligung an der Antarktisforschung

P. Glöde war durch seine Teilnahme an der 6. (1960–1962) und 13. **S**owjetischen **A**ntarktis-**E**xpedition (SAE, 1967–1969) mit der Antarktisforschung in besonderer Weise verbunden. Er unterstützte später die Errichtung einer Container-Station in der Schirmacher-Oase im Rahmen der 21. SAE (1975–1977), indem H. Gernandt als AOL-Mitarbeiter diese für die Antarktisforschung der DDR wichtige Mission übernahm. Zunächst war diese Station ein Teil der russischen Station Nowolasarewskaja. 1987 erlangte sie als Station „Georg Forster" auch organisatorische Selbstständigkeit.

Die wissenschaftlichen Programme der Antarktisforschung der DDR sind vom AOL für die Bereiche Wettersatellitenempfang, Ozonforschung und Aerosolforschung begleitet worden. Bereits 1976 wurden von der AOL-Gruppe in der Antarktis Ozonsondierungen mit der elektrochemischen Sonde OSM 2 vorgenommen und der Empfang und die Auswertung von Wettersatellitenbildern als meteorologisches Standardprogramm der DDR-Antarktisforschung verwirklicht. Beginnend mit der 30. SAE (1984–1986) wurden regelmäßige Ozonsondierungen mit den von H. Steinhagen und G. Peters entwickelten mobilen Messplätzen zur Startvorbereitung von Ozonsonden durchgeführt. Dazu erfolgte seitens des AOL (G. Peters) die Vorbereitung aller Messeinrichtungen sowie die Einweisung und Betreuung der Expeditionsteilnehmer. Mit den in der Antarktis durchgeführten Ozonsondierungen ist ein wesentlicher Beitrag zur Erforschung des Ozonlochs über der Antarktis geleistet worden (GERNANDT et al. 1989).

Ein weiterer Beitrag wurde durch das AOL zur Aerosolforschung erbracht, indem im Rahmen der 30. SAE Strahlungsmessungen mit dem **B**oden-**A**tmosphären-**S**pektrometer BAS an den russischen Stationen Molodjoshnaja, Mirny und Wostok Messungen durchgeführt wurden, die der Untersuchung der optischen Dicke der Atmosphäre in der Antarktis dienten (LEITERER und SCHULZ 1987).

5.6 Beiträge zur Ozonforschung

Zur Erforschung der gegenläufigen Trends der Ozonkonzentration in verschiedenen Höhenniveaus der Atmosphäre war bereits 1976 auf Initiative von K.-H. Grasnick (MHO) und D. Sonntag (AdW) bei der AdW in enger Kooperation mit MHO und AOL die Entwicklung einer elektrochemischen Ozonsonde OSE 2/OSM 2 begonnen worden, die seit Dezember 1974 am AOL regelmäßig gestartet wurde. M. Görsdorf (AOL) führte 1970 und 1978 durch seine Teilnahme an den internationalen Ozonsondenvergleichen der WMO am MO Hohenpeißenberg den Nachweis zur Messgenauigkeit dieser Ozonsonde. Nach 8-jährigen Lindenberger Ozonsondierungen konnte von U. Feister (MHO) die wichtige Schlussfolgerung gezogen werden, dass die Ozonkonzentration in der Troposphäre zunahm, während in der unteren Stratosphäre eine Abnahme zu verzeichnen war.

In den achtziger Jahren führte die wachsende Aktualität der Ozonforschung zu Anforderungen, die vertikale Ozonverteilung in möglichst vielen Ländern zu messen. Fast jährlich weilten Spezialisten aus den Ostblockländern (Bulgarien, Grusinien, Polen, Russland) am AOL, um sich in die Technologie der Ozonsondierung unterweisen zu lassen. Zur Erkundung der vertikalen Ozonverteilung im Indischen Ozean unternahmen E. Peters und P. Plessing (MHO) 1977 Ozonsondierungen von Bord des Forschungsschiffes *Akademik Shirshov*. Zwei Jahre später beteiligten sich M. Weller und U. Leiterer bei dem Experiment MONEX 79 ebenfalls mit Ozonsondierungen im Indischen Ozean. Im Rahmen des Regierungsabkommens zur Hochatmosphäre wurden von Mitarbeitern des AOL mehrfach Ozonsondierungen bei Wolgograd durchgeführt, um Anschlusswerte für die gleichzeitige Messungen des Ozons in der Hochatmosphäre mit Spektrometern der AdW und der meteorologischen Rakete M100 bereitzustellen. Der Wunsch der russischen Seite, Ozonsonden sowohl in der Arktis (Hayes-Insel) als auch in der Antarktis (Mirny) zu starten, führte ab 1984 zu erhöhten Anforderungen an das AOL, weil sämtliche für die Forschungsprogramme in der Antarktis, Arktis und für Expeditionen benötigten Ozonsonden vor ihrem Einsatz am AOL getestet werden mussten. Seitens der ZWG wurde bei der Herstellung der Ozonsonden keine Produktpflege betrieben, so dass dem AOL zwangsläufig die Rolle der Weiterentwicklung zufiel. Da z. B. die Übertragung der Ozonwerte asynchron zu denen der Radiosonde erfolgte, traten systematische Übertragungsverluste auf. Zur Vermeidung dieser Verluste entwickelte H. Steinhagen eine Lösung zur synchronen Übertragung der Ozonwerte (STEINHAGEN et al. 1987). Dies führte 1987 in Verbindung mit der neuen, in die Routine eingeführten Radiosonde MARZ zu ei-

ner vollständig überarbeiteten Ozonsonde OSE 4, die anschließend vom ZWG produziert wurde (Abb. 1-29). Schließlich konnte die systematische Abweichung des Korrekturfaktors der Ozonsonde auf eine fälschlich angenommene Pumpenkorrektur zurückgeführt werden, indem 1988 die Pumpleistung bei niedrigem Druck mit einer speziell entwickelten Vorrichtung experimentell bestimmt wurde. Die Anwendung dieser verbesserten Pumpenkorrektur führte zur Verminderdung der systematischen Unterschätzung der Ozonwerte.

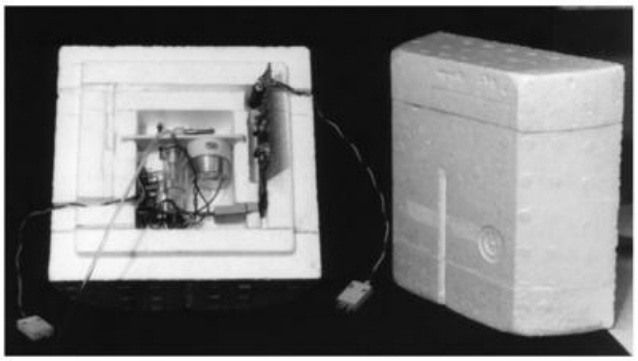


Abb. 1-29: Ozonsonde OSE-4 mit Anpassung an die russischen Radiosonden des Typs MARZ.

5.7 Beiträge zur Fernerkundung

Im Rahmen der Arbeiten zur Fernerkundung der Erde erhielt das AOL 1975 den Auftrag zur Erfassung des Atmosphärenzustandes, um multispektrale Beobachtungen der Erdoberfläche von Satelliten und Flugzeugen mit der Multispektralkamera MKF-6 exakt interpretieren zu können. Aus spektralen Messungen des direkten Sonnenlichtes im Bereich von 0,4 bis 1,1 µm mit einem **B**oden-**A**tmosphären-**S**pektrometer (BAS, Abb. 1-30 links) wurde von LEITERER und WELLER (1988) eine Methode entwickelt, mit der multispektrale Messungen von Satelliten oder Flugzeugen korrigiert werden konnten. WELLER und LEITERER (1988) führten die Messungen der optischen Dicke der Atmosphäre am AOL und in anderen Regionen durch. Dazu wurde das BAS in mehreren Schritten weiterentwickelt. Dabei ging es auch um die Anpassung an die verschiedenen Einsatzfälle der Messung unter extremen Bedingungen (Antarktis, Arktis) sowohl vom Erdboden aber auch von Schiffen, Flugzeugen und Hubschraubern. Zur Verbesserung der Handhabbarkeit des Gerätes bei den schwierigen Einsatzbedingungen wurde eine Mikrorechnervariante geschaffen (Abb. 1-30 rechts), die eine Erhöhung der Geschwindigkeit bei der Erfassung der Einzelwerte eines Spektrums, eine numerische und grafische Ausgabe der verschiedenen aus den Spektralmessungen abgeleiteten Strahlungsmesswerte und eine Speicherung aller gemessenen und ausgewerteten Daten vorsah (SCHULZ und LEITERER 1987). Durch Messungen auf der Hayes-Insel, in Zingst, Lindenberg, Hohenpeißenberg und in der Antarktis konnten so Meridianschnitte des Aerosolgehaltes der Atmosphäre erstellt werden.

Abb. 1-30: Boden-Atmosphären-Spektrometer BAS (links) und mikroprozessorgesteuerte Signalverarbeitung BAS-M mit A/D-Wandler, Magnetbandspeicher, Thermodrucker, Tastatur und Anzeigeeinheit (rechts).

In Verbindung mit einer Verstärkung der experimentellen Grenzschichtforschungen im MD, u. a. für Untersuchungen des Schadstofftransportes, wurde 1988 am AOL ein an der AdW entwickeltes Vertikal-SODAR in Betrieb genommen und das AOL mit dem Aufbau eines entsprechenden MD-Messnetzes beauftragt. Bis 1990 konnten 11 Stationen aufgebaut werden.

6. Das Meteorologische Observatorium Lindenberg 1991 bis 2005

6.1 Vorbemerkung

Der folgende Abschnitt 6 beschreibt die Integration des Observatoriums Lindenberg in den DWD als Teil der Strategie „Observation und Simulation". Diese Integration war verknüpft mit der Konzeption und Durchsetzung einer neuen Forschungsstruktur und notwendigerweise mit dem Aufbau neuer Messfelder, Laboreinrichtungen und der umfassenden Rekonstruktion und Grundsanierung der gesamten Infrastruktur der Liegenschaft Lindenberg. Dabei wurde angeknüpft an die Visionen des Gründers des Observatoriums vor 100 Jahren, der ein Monitoring der Vertikalstruktur der Atmosphäre an einem repräsentativen Standort angestrebt hatte. Darüber hinaus mussten aber die Anforderungen eines modernen Wetterdienstes berücksichtigt werden, die eine ständige Verknüpfung der Beobachtungsprogramme mit der operationellen Wettervorhersage, insbesondere der numerischen Vorhersage, und die Integration der Monitoringaufgaben in internationale Programme und Projekte der WMO und des WCRP (**W**orld **C**limate **R**esearch **P**rogram-

me) notwendig machen, siehe dazu auch den Beitrag von LEMKE S. 197-200. Die Bereitstellung belastbarer Mess- und Beobachtungsreihen und die wissenschaftliche Interpretation der Daten für ausgewählte Probleme der angewandten Atmosphärenforschung sowie die wissenschaftlich-technische Vorbereitung moderner Mess- und Interpretationsverfahren für den operationellen Dienst sind die Hauptaufgaben des Observatoriums.

Die erste Arbeitsphase bis etwa 1994 (s. Abschnitt 6.2) beinhaltete die Konsolidierung nach der markanten Reduktion der Mitarbeiterzahl und die Formulierung erster wissenschaftlicher Aufgaben im Verbund mit den übrigen drei meteorologischen Observatorien des DWD in Hamburg, Hohenpeißenberg und Potsdam. Damit verbunden war auch eine intensive Einwerbung fremdfinanzierter Projektmittel als Anschubfinanzierung. Der folgende Zeitabschnitt von etwa 9 Jahren Dauer (Abschnitt 6.3) steht für die Gestaltung des neuen Forschungsstandortes Lindenberg in deutlicher Abgrenzung und Abstimmung mit den Aufgaben der verbliebenen übrigen zwei Observatorien am Hohenpeißenberg und in Potsdam. Nach der vom BMVBW/DWD (**B**undes**m**inisterium für **V**erkehr, **B**au und **W**ohnungswesen) angeordneten weiteren Konzentration der Observatoriumsforschung nur noch an zwei Standorten und der Auflösung des **M**eteorologischen **O**bservatoriums **P**otsdam (MOP) im Herbst 2002 wurde schließlich mit der Bildung von vier Sachgebieten das gesamte bodengebundene Monitoring der atmosphärischen Vertikalstruktur am Standort Lindenberg zusammengeführt (s. Abschnitt 6.4).

Die wissenschaftlichen Arbeiten des MOL werden in den Kap. 3 bis 8 dieses Heftes ausführlich beschrieben. Dort sind auch Literaturangaben für den Zeitraum der neunziger Jahre bis zur Gegenwart angeführt. Es wird daher im vorliegenden Abschnitt 6 auf eine Wiederholung dieser Zitate verzichtet. Eine summarische Beschreibung der Forschungsleistungen der Observatorien sind den veröffentlichen Jahresberichten des DWD für die Jahre 1991 bis 2004 zu entnehmen. Die detaillierten Forschungsergebnisse findet man in den „Jahresberichten der Meteorologischen Observatorien 1995–2004", die als Sonderhefte des DWD-Geschäftsbereiches Forschung und Entwicklung seit 10 Jahren vorliegen.

6.2 Das Meteorologische Observatorium Lindenberg 1991 bis 1994

Die in der 100-jährigen Geschichte des Observatoriums sowohl wissenschaftlich als auch strukturell deutlichsten Veränderungen waren mit der Eingliederung des Meteorologischen Dienstes der DDR in den DWD verknüpft. Dieser Eingliederungsprozess erfolgte parallel zur Vorbereitung der Vereinigung der beiden deutschen Staaten und erstreckte sich bis zu einer definitiven Entscheidung über das gesamte Jahr 1990. Auf der Arbeitsebene der Wissenschaftler wurden nach der sog. Wende die Beziehungen zu wissenschaftlichen Einrichtungen in der BRD sofort aktiviert, obwohl durch die drastischen Kontakt-, insbesondere Reisebeschränkungen, in der DDR und die Geheimhaltungsvorschriften für das AOL der gegenseitige Informationsstand außerordentlich gering war. Offiziell wurde in einer Folge von vier Treffen des Präsidenten des DWD H. Reiser und des Direktors des MD W. Böhme zwischen Februar und August 1990 über konkrete Modalitäten zur Gestaltung eines künftigen Deutschen Wetterdienstes (Meteorologischen Dienstes) beraten. Mit dem Erlass des Bundesministers für Verkehr der BRD vom 25. September 1990 „Herstellung der Deutschen Einheit – Organisation des Deutschen Wetterdienstes" wurde der MD zum 3. Oktober 1990 dem DWD zugeordnet.

Im Verlaufe der vorhergegangenen Beratungen zeigten sich besonders bei der Rolle der Forschung im DWD und MD grundsätzliche Unterschiede. Während im DWD die atmosphärisch-physikalische Forschung deutlich auf eine angewandte Forschung für die Dienstbelange des DWD konzentriert und die Kooperation mit einer Vielfalt von Grundlagenforschungseinrichtungen an Universitäten, Großforschungseinrichtungen, Max-Planck-Instituten u.ä. typisch war, führte der MD, entsprechend seinem Auftrag, neben der anwendungsorientierten Forschung auch Grundlagenforschungen aus. Die Forschung war vor allem an den Observatorien Potsdam, Lindenberg, Wahnsdorf und an der Zentralen Wetterdienststelle in Potsdam konzentriert. Die Kooperation mit Hochschuleinrichtungen und Akademieinstituten beruhte vornehmlich auf entsprechenden Anforderungen des MD und wurde auch vom MD koordiniert, kontrolliert und z. T. finanziert. So wurde z. B. das Klimaforschungsprogramm der DDR unter der Federführung des Direktors des MD ausgearbeitet. Dadurch waren in der Forschung des MD etwa dreimal mehr Mitarbeiter tätig als in analogen Dienststellen des DWD. In dem o. a. Erlass wurde die Zukunft der Observatorien noch nicht endgültig festgelegt, jedoch wurde dem DWD die vorläufige Dienst- und Fachaufsicht bis Ende 1990 übertragen und die Mitarbeiter in den Wartestand versetzt. Als kommissarischer Dienststellenleiter des AOL wurde von Oktober bis Dezember 1990 U. Leiterer eingesetzt.

Bereits vom 11. bis 13. September 1990 fand im Rahmen eines Besuches in Lindenberg und in Potsdam eine wissenschaftliche Bestandsaufnahme der Observatorien durch den Abteilungspräsidenten Forschung des DWD E. Müller mit Mitgliedern des wissenschaftlichen Beirats des DWD (u. a. H. Hinzpeter, H. Fortak) statt. Im Rahmen der allgemeinen Evaluierung der Forschungseinrichtungen in Ostdeutschland erfolgte am 12. Dezember 1990 auch eine ausführliche Begutachtung der Arbeiten des AOL durch den Wissenschaftsrat der BRD. Mit einem Beschluss des Bundesministeriums für Verkehr wurden schließlich die Ob-

servatorien Potsdam und Lindenberg zum 31.12.1990 aufgelöst. Gleichzeitig wurden mit der Bezeichnung **M**eteorologisches **O**bservatorium **P**otsdam (MOP) und **M**eteorologisches **O**bservatorium **L**indenberg (MOL) aus den ehemaligen Forschungseinrichtungen des MD in Potsdam und Lindenberg neue Einrichtungen mit modifizierter Aufgabenstellung eingerichtet. Das MOP und das MOL waren Dienststellen mit überregionalen Aufgaben im DWD und wurden der Abteilung Forschung des Zentralamtes unterstellt. Mit der kommissarischen Leitung ab 01.01.1991 wurden für das MOP der Leiter der Abteilung Forschung E. Müller und für das MOL der Leiter des Fachreferates F4 „Forschungskoordinierung" in der Abteilung Forschung J. Schwirner beauftragt. Gleichzeitig begannen intensive Bemühungen der Leitung und des wissenschaftlichen Beirats des DWD um die endgültige Besetzung der Observatoriumsleitungen. Da die kommissarischen Leiter ihre Hauptaufgaben am Zentralamt in Offenbach weiterführen mussten, konnten sie nur zeitweilig an den Observatoriumsstandorten sein und hatten örtliche Vertreter ernannt, für das MOL H. Gernandt. Am 15. Oktober 1991 erfolgte die Berufung von D. Spänkuch zum Leiter des MOP. Zum 1. Januar 1992 schließlich wurde J. Neisser als Leiter des MOL berufen. J. Neisser war vorher Leiter der Abteilung „Grundschicht" des Heinrich-Hertz-Instituts Berlin an der Akademie der Wissenschaften, deren Forschungsinstitute entsprechend den Festlegungen im Einigungsvertrag zum 31. Dezember 1991 aufgelöst worden waren.

Für die Mitarbeiter des AOL waren die Eingliederungsmaßnahmen in den DWD mit besonders drastischen Eingriffen verbunden. Während aus dem gesamten MD etwa 2/3 der Mitarbeiter in den DWD übernommen wurden, blieben in Lindenberg von den ursprünglich etwa 125 Mitarbeitern nur etwa 45 übrig. Die ZRSD in Berlin-Rummelsburg und die Raketenstation in Zingst, beides Außenstellen des AOL, wurden in andere DWD-Strukturen bzw. an das UBA (**U**mwelt-**B**undesamt) überführt. Die Aufgaben des neuen MOL mussten nunmehr vorrangig an den Erfordernissen des DWD ausgerichtet und mit anderen Forschungseinrichtungen abgestimmt werden. Damit waren Themen zur Hochatmosphärensondierung und Messungen in der Antarktis (s. Abschnitt 5) nicht mehr relevant. Die wissenschaftlichen Untersuchungen zum atmosphärischen Ozon z. B. konnten im DWD aus vielfältigen Notwendigkeiten nur an einem Observatorium, hier dem **M**eteorologischen **O**bservatorium **H**o**h**en**p**eißenberg (MOHp), erfolgen. Die umfangreiche Werkstattkapazität des ehemaligen AOL, die zu DDR-Zeiten aus gutem Grund der Notwendigkeit zum Eigenbau von Geräten und der Materialbevorratung in einer Mangelwirtschaft geschuldet war, musste drastisch abgebaut werden. Andererseits wurde jedoch mit dem Spezialwissen der verbliebenen Wissenschaftler, etwa auf dem Gebiet der wissenschaftlichen Begleitung der Radiosonden- und Ozonmessungen (E. Asseng, H. Dier, U. Leiterer, H. Gernandt, H. Steinhagen, U. Görsdorf), der spektral-optischen Sondierung atmosphärischer Spurenstoffe (U. Leiterer, M. Weller) oder auf dem Gebiet der wissenschaftlich-technischen Konzeption und dem Bau moderner elektronischer Messsysteme (H. Steinhagen), viel neues Know-how in den DWD eingebracht. Weiterhin verfügte das MOL mit einer etwa 28 ha großen Liegenschaft über eine Fläche, die für zukünftige messtechnische Observatoriumsaufgaben außerordentlich wichtig und schon aus Kostengründen in den alten Bundesländern nicht realisierbar war.

Bei der neuen Arbeit in einer Bundesbehörde musste das gesamte Planungs-, Investitions- und Personalwesen nach völlig neuen Gesetzen, Ordnungen und Verfügungen erlernt werden. Auch dabei leisteten die kommissarischen Leiter aus der Zentrale eine entscheidende Unterstützung. Große fachliche Unterstützung kam aus den Reihen des wissenschaftlichen Beirats, wobei sicherlich der gute Ruf des Observatoriums als aerologische Beobachtungs- und Forschungseinrichtung aus den ersten 60–70 Jahren des Hauses eine große Rolle spielte. Von dieser Seite kamen vor allem Ideen und Lösungsvorschläge für neue Themen zur Atmosphärensondierung, die die Forderungen des Wetterdienstes berücksichtigten und unter Nutzung der Erfahrungsträgerschaft und der logistischen Randbedingungen gerade in Lindenberg optimal zu bearbeiten waren. Dazu gehörte auch die Unterstützung bei der Inanspruchnahme von Forschungsfördermitteln, z. B. aus dem BMFT, und bei der Beteiligung der vorhandenen Lindenberger Messgerätesysteme an nationalen und internationalen Kampagnen und Projekten. Auch in den Zwischenberichten der Evaluierungsgremien des Wissenschaftsrates vom 5. Juli und 15. November 1991 wurde die Gründung von MOP und MOL innerhalb des DWD sowie die interne Aufgabenabstimmung im DWD unter Beachtung des vorhandenen Forschungspotentials an MOP und MOL unterstützt.

Die Aufgabenabstimmung mit den Programmen der Observatorien Hamburg, Hohenpeißenberg und Potsdam führte für das MOL zu der Forderung, ein stabiles Monitoring einschließlich der erforderlichen wissenschaftlichen Dateninterpretation zum Vertikalaufbau der Atmosphäre vom Erdboden bis zur Gipfelhöhe der Radiosondierungen schrittweise zu realisieren. Für das Kompositum aus möglichst vielen Messparametern verschiedener Messverfahren am Standort des MOL wurde der Begriff „Lindenberger Säule" geprägt. Die messtechnische Basis waren zunächst nur die in Lindenberg vorhandenen Messsysteme Radisonde mit Ozonsonde, optische Spektrometer für Aerosol und ausgewählte Spurenstoffe, ein Vertikal-Sodar und die operationelle Wetterstation. Die unbedingt erforderliche Erweiterung der messtechnischen Basis konzentrierte sich zunächst auf die Installation eines Systems für die bodengebundene Fernsondierung von Wind-

und Temperaturprofilen (Windprofiler/RASS [**R**adio **A**coustic **S**ounding **S**ystem]) sowie den Aufbau eines Monitorings mit Spektrometern. Mittelfristig musste dann der Aufbau des modernen Monitorings von Landoberflächen- und Grenzschichtprozessen am Standort des MOL erfolgen. Für zunächst 2–4 Jahre wurden DWD-interne Forschungsprojekte für das MOL formuliert und eine neue Personalstruktur eingeführt. Anfang 1992 erfolgte die Berufung der Dezernatsleiter und ab 1. Mai 1992 konnten die insgesamt 46 Mitarbeiter folgenden Fachdezernaten zugeordnet werden:

MOL 1: „Aerologie der klassischen meteorologischen Zustandsgrößen" (insbesondere bodengebundene Fernsondierung)
Leiter: J. Neisser

MOL 2: „Aerologie der Luftbeimengungen" (insbesondere Messungen der spektralen optischen Dicke des Aerosols)
Leiter: M. Weller

MOL 3: „Aerologische Überwachung der Atmosphäre" (Daten-Pool, Wetter- und Radiosondenbeobachtungen)
Leiter: H. Gernandt, ab 8/1992 E. Asseng, ab 4/1993 H. Dier

Wegen des Fehlens von Erfahrungsträgern auf dem Gebiet der Landoberflächen- und Grenzschichtforschung am MOL wurde diese Aufgabe gemeinsam mit dem MOP bearbeitet und die Konzeption für ein zu errichtendes „**G**emeinsames **M**essfeld" (GM) entwickelt. Das wissenschaftliche Aufgabenkonzept für das GM wurde im April 1992 in der Leitung des DWD verteidigt. Parallel dazu erfolgte in der Umgebung des Observatoriums die Suche nach einem geeigneten Messgelände. Aus etwa 5 Standorten wurde schließlich eine landwirtschaftliche Fläche von etwa 9 ha Größe in der Nähe der Gemeinde Falkenberg, ca. 5 km südlich von Lindenberg, ausgewählt. Ausschlaggebend für die geplanten mikrometeorologischen Boden- und Mastmessungen (bis etwa 100 m Höhe) waren die Oberflächenbeschaffenheit des Messfeldes und möglichst wenig Strömungshindernisse (Bewuchs, Bebauung, Geländeunebenheiten u. ä.) im klimatologischen Hauptströmungssektor. Dabei mussten auch Betrachtungen über zukünftig zu erwartende Veränderungen einbezogen werden, da aus Erfahrungen bekannt war, dass ähnliche, investitionsintensive Anlagen häufig durch spätere Veränderungen des Umfeldes für die ursprüngliche messtechnische Zielstellung untauglich werden. Dies ist aber für ein auf Langzeitmessungen orientiertes Observatorium besonders schwerwiegend. Die Kaufverhandlungen für das GM zogen sich sehr lange hin, so dass erst Ende 1994 der Geländeerwerb für das MOL abgeschlossen war.

Bereits zu Beginn der Diskussionen über die neuen Aufgaben in Lindenberg wurde offensichtlich, dass mit den Mitteln des DWD-Haushaltes allein eine Realisierung der umfangreichen Investitionen nur sehr langfristig und oft überhaupt nicht erfolgen konnte. Mit Unterstützung des wissenschaftlichen Beirats (besonders H. Hinzpeter, H. Graßl) wurden bereits 1991 erhebliche Fremdmittel als Anschub für neue MOL-Aufgaben eingeworben. Es handelt sich um folgende Projekte:

1. „Windprofiler/RASS", BMFT-Mittel, Leiter: H. Steinhagen, 1991–1995,
2. „Optische Feldmessmethoden", BMFT-Mittel, Leiter: U. Leiterer, 1991–1995,
3. Beteiligung an Messprogrammen:
   - SANA (**San**ierung der **A**tmosphäre/neue Bundesländer), BMFT-Mittel, Leiter: M. Weller, 1991–1993,
   - BayFORKLIM (**Bay**risches **Klima**for**s**chungsprogramm), Mittel des Landes Bayern, Leiter: M. Weller, 1991–1998,
   - EASOE (**E**uropean **A**rctic **S**tratospheric **O**zone **E**xperiment), EU-Mittel, Leiter: H. Gernandt, 1991–1992.

Im Rahmen dieser Projekte konnten bis zu 14 Zeitangestellte am MOL beschäftigt und kurzfristig erhebliche Sachmittel eingesetzt werden. Besonders die beiden Projekte „Windprofiler" und „optische Feldmessmethoden" mit 12 Zeitangestellten und einer Laufzeit bis 1995 haben nachhaltig die Gestaltung des neuen Lindenberger Profils unterstützt. Darüber hinaus konnte durch die befristete Anstellung von nicht übernommenen AOL-Mitarbeitern auch Fachwissen erhalten und vor allem für technische Mitarbeiter soziale Härten gemindert werden. Die experimentelle Basis des MOL wurde durch Investitionsmittel aus den Projekten und aus dem DWD-Haushalt bereits in den ersten drei Jahren entscheidend verbessert. Das betraf folgende Messprogramme und Messsysteme:

1. Quasi-operationelle Bereitstellung hochaufgelöster Wind- und Temperaturprofile und Analyse von mesoskaligen Strukturen in der unteren Troposphäre (s. Kap. 5):
   - Aufbau des 1290-MHz-Grenzschichtprofiler/RASS (Abb. 1-31) im Oktober 1993, Aufnahme des Dauerbetriebs ab Dezember 1993 (Leistung im BMFT-Projekt „Windprofiler/RASS"),

Abb. 1-31: 1290-MHz-Grenzschicht-Wind-Profil-Radar/RASS LAP 3000. Drehplattform mit elektromagnetischer (rechts) und akustischer Antenne (links). Foto: H. Steinhagen, MOL.

- Einsatz des speziellen Fesselballonsystems AIR TMT-4a für die synchrone Messung von 5 Parametern (u. a. Windvektor) in 6 Höhenniveaus, ab Januar 1994 (Abb. 1-32), s. Kap. 5.

2. Aufbau eines stabilen Monitorings der optischen Dicken für Aerosol, Ozon, NO_2 und SO_2 sowie UV-B-Bestrahlungsstärken am Standort des MOL und von Trübungsmessungen auf der Trasse Zingst-Lindenberg-Hohenpeißenberg (s. Kap. 3):
   - Einsatz eines BREWER M IV-Spektrometers und Entwicklung des Routinespektrometers ROBAS; Routineeinsatz der Geräte ab Anfang (BREWER) bzw. Ende (ROBAS) 1993, s. Abb. 1-33 und 1-34,
   - Ausrüstung des Optik-Labors für Spektrometerkalibrierungen im UV-B, VIS und NIR.
   Die Leistungen erfolgten zum erheblichen Teil aus dem BMFT-Projekt „Optische Feld-Messmethoden".
3. Modernisierung des Routinemessprogramms mit Radiosonden und Ozonsonden (s. Kap. 4):
   - Ablösung der russischen Radiosonde MARZ 2.2/Meteorit II durch die finnische Sonde RS 80-15NS/Omega bzw. Radar, Routineeinsatz ab April 1992 nach etwa 55 Vergleichsaufstiegen,
   - Übergang von der Ozonsonde OSE-4 zur ECC-Sonde. Routineeinsatz ab Juli 1992 nach etwa 15 Vergleichsaufstiegen (z. T. im EASOE-Projekt).
4. Erweiterung des Strahlungsmonitorings (s. Kap. 3):
   Installation der BSRN-Station Lindenberg (Abb. 1-35) für breitbandige Referenzstrahlungsmessungen, Probebetrieb ab Februar, Routinebetrieb ab Oktober 1994 (unter fachlicher Verantwortung des MOP).

Nach der ersten Konsolidierungsphase wurden ab 2. Halbjahr 1992 neben der Beteiligung an zentralen Kampagnen (z. B. SANA, BayFORKLIM, EASOE) auch bilaterale Kampagnen oder Experimente mit Kooperationspartnern durchgeführt. Erwähnenswert ist dabei die Durchführung von 2 Freiballonfahrten am 22. August 1992 über Lindenberg zusammen mit der „Fördergemeinschaft Wissenschaftliche Ballonfahrt e.V. Gersthofen" (Bayern). Bei diesen Fahrten (Leitung: U. Leiterer, M. Weller), die auch eine Reminiszenz der wissenschaftlichen Ballonfahrten am Observatorium vor fast 100 Jahren waren, wurden mit der Flugsvariante des BAS optische Messungen über die Vertikalverteilung verschiedener, variabler Luftbeimengungen, wie Aerosol, Ozon, Wasserdampf und Stickoxyd vom Boden bis etwa 1.600 m über Grund, also für die anthropogen besonders belastete Grundschicht, durchgeführt (s. Abb. 1-36). Bei einer Messkampagne gemeinsam mit dem Max-Planck-Institut für Aeronomie in Kathlenburg-Lindau im Herbst 1992 wurden erste Erfahrungen zur Messung klassischer meteorologischer Zustandsgrößen mit einem bodengebundenen Radarsystem, hier dem SOUSY-VHF-Dopplerradar (50 MHz) des MPI, erhalten. Bei der Kampagne konnten auch erste Vergleiche mit den

Abb.1-32: Fesselballonsystem AIR/TMT4a, Synchrone Messung von Temperatur, Feuchte und Windvektor in 6 Niveaus bis in etwa 1.000 m Höhe. Foto: U. Görsdorf, MOL.

Abb. 1-33: BREWER MK IV Nr. 078-Spektrometer, Messung der UV-B-Strahlung und der Konzentration von SO_2 und NO_2. Foto: D. Dauß, MOL

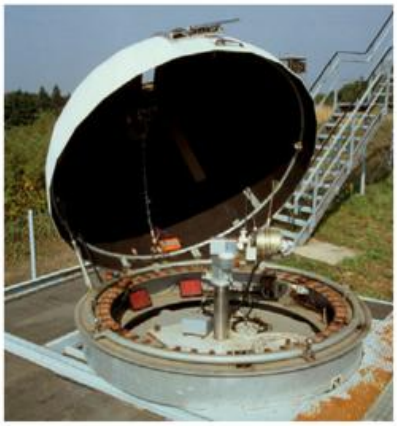


Abb. 1-34: ROBAS 20-Spektrometer (mit automatischer Sonnennachführung; hier mit aufgeklappter Schutzhaube), Messung der optischen Dicke der Aerosole und des Wasserdampfes. Foto: D. Dauß, MOL.

Abb. 1-35: BSRN-Station Lindenberg, Messplattform (1994–2001) für das breitbandige Strahlungsmonitoring, Sicht von Ost: rechts Wand des Windenhauses, im Hindergrund (Mitte) 30-m-Messturm. Foto: D. Dauß, MOL.

Abb. 1-36: Freiballonfahrt am 22. August 1992 (Ballonvolumen 780 m³). Flugspektrometer BAS am Ballonkorb, Foto: U. Leiterer, MOL.

„first-guess" Daten des operationellen Europa-Modells des DWD und mit Rawinsondendaten durchgeführt werden (Leitung: J. Neisser, H. Steinhagen). Neben der Verbesserung der Ausstattung mit Messsystemen konnten in dieser Arbeitsphase gleichzeitig wichtige Verbesserungen an der Infrastruktur, wie etwa die Erneuerung der observatoriumsinternen Informationskanäle und die Verbesserung der völlig umzureichenden IT-Ausrüstung durchgeführt werden. Im 1. Halbjahr 1994 wurde die 1905 errichtete Ballonhalle rekonstruiert. Sie bietet mit 10 m Breite, 10 m Höhe und 25 m Länge die Möglichkeit, große Ballone, z. B. für das Fesselballonsystem oder Ballonsysteme, z. B. bei Radiosondenvergleichen, für den Einsatz zu präparieren und gesichert aufzubewahren. Weiterhin dient sie der Präsentation historischer Drachen (Abb. 1-37). Die historisch-authentische Rekonstruktion und der Nachbau von aerologischen Messdrachen aus den Restbeständen des ehemaligen AOL der zwanziger und dreißiger Jahre des letzten Jahrhunderts (s. Abschnitt 3) wurden auf der Grundlage einer Vereinbarung des MOL mit dem Drachenbauer W. Schmidt, Drachenverein Bottrop (Ruhrgebiet), mit außerordentlicher Sachkenntnis und mit größtem Engagement ehrenamtlich bereits Anfang der neunziger Jahre begonnen und in den folgenden Jahren bis zur Gegenwart fortgeführt.

Abb. 1-37: Ballonhalle (Baujahr 1904/05, Rekonstruktion 1994), Sicht von Ost bei geöffneten Schiebetoren; vorn: Füllanlage für Radiosondenballone, hinten, oben: Rekonstruierte Drachen. Foto: D. Dauß, MOL.

6.3 Das Meteorologische Observatorium Lindenberg 1994 bis 2002

Schon 1993 begannen Beratungen über eine neue Struktur des MOL, da die in der Konsolidierungsphase festgelegte Dezernatseinteilung nicht den Fachaufgaben des Geschäftsverteilungsplanes für ein Monitoring der gesamten „Lindenberger Säule" entsprach. Insbesondere für die Grenzschichtuntersuchungen war keine Kapazität in Lindenberg vorhanden, während umgekehrt am MOP ein leistungsstarkes Dezernat „Turbulenz und Grenzschicht" (Leiter Th. Foken) existierte. Mit der Auflösung des Observatoriums Hamburg zum 30.04.1994 wurde die Strahlungsforschung, einschließlich der Betreuung des DWD-Strahlungsnetzes (bisher MO Hamburg) und die passive Fernsondierung (u. a. Aerosolsondierung bisher am MOL) in Potsdam konzentriert. Gleichzeitig erfolgte in Lindenberg die Neugründung eines Dezernats für Landoberflächen- und Grenzschichtforschungen, das personell aus dem entsprechenden Dezernat am MOP (Th. Foken, S. Richter, W. Gerstmann) hervorging. Damit konnte der Start der Grenzschichtuntersuchungen in Lindenberg mit Nutzung des Potsdamer Fachwissens sehr effektiv gestaltet werden. Ab 1. Mai 1994 arbeiteten am MOL die folgenden drei Dezernate/Sachgebiete:

MOL 1: „Verfahren der Sondierung"
Leiter: H. Steinhagen
MOL 2: „Landoberflächenprozesse und Grenzschicht"
Leiter: Th. Foken, ab 12/1997 F. Beyrich
MOL 3: „Lindenberger Säule" – Langzeitüberwachung und Wetterfachdienst
Leiter: U. Leiterer

Die Struktur entsprach den wissenschaftlichen Hauptaufgaben für das MOL und ist, unbenommen eines später hinzugefügten Strahlungssachgebietes, bis zur Gegenwart gültig.

Mit umfangreichen Haushaltsmitteln des DWD und dem konsequenten Einsatz der Personalressourcen (48 Mitarbeiter, davon 12 Wissenschaftler) wurde in den Folgejahren ein umfassendes Monitoring für eine vertikale Atmosphärensäule vom Boden bis etwa 30 km Höhe durch die Installation von modernen Messsystemen und die Einrichtung neuer Messfelder aufgebaut. Die Arbeiten der 3 Sachgebiete konzentrierten sich auf folgende Aktivitäten:

Sachgebiet: Verfahren der Sondierung (s. Kap. 5)
Hauptaufgabe war die Schaffung der wissenschaftlichen, technischen und logistischen Voraussetzungen zum Einsatz der aktiven Fernsondierungstechnologien Windprofiler, RASS und SODAR (**So**nic **D**etection **a**nd **R**anging), d. h. die Optimierung des Messbetriebes und Untersuchungen zur Ableitung qualitätsgeprüfter meteorologischer Parameter. Neben dem Einsatz dieser Geräte für das Observatoriums-Monitoring („Lindenberger Säule") musste auch deren operationelle

Anwendung im DWD vorbereitet werden (H. Steinhagen, D. Engelbart, U. Görsdorf, V. Lehmann). Nach der bereits 1993 erfolgten Inbetriebnahme eines Grenzschichtwindprofiler/RASS (1290 MHz) und ab 1994 eines Fesselballonsystems wurden folgende Messsysteme neu installiert:

- 482-MHz-Troposphärenwindprofiler/RASS:
  Start des Probebetriebs im Juli 1996; Bereitstellung von hochaufgelösten Windprofilen bis zur oberen Tropo-/unteren Stratosphäre und von Temperaturprofilen bis in 4 km Höhe (s. Abb. 1-38),
- Phasenarray-Doppler-SODAR/RASS:
  Start des Probebetriebs ab Februar 1998 auf dem GM; Bereitstellung von Wind- und Temperaturprofilen für die Höhenlücke zwischen Mastmessungen des GM und den Messungen des 1290-MHz-Windprofiler/RASS,

Abb. 1-38: 482-MHz-Troposphären-/Wind-Profil-Radar/RASS LAP 16000, elektromagnetische Antennenanlage (13x13 m²) des Windprofilers mit 4 akustischen Antennen zur Messung des Profils der virtuellen Temperatur (ohne Clutterzaun, s. Kap. 5). Foto: H. Steinhagen, MOL.

Abb. 1-39: 12-Kanal-Mikrowellenprofiler TP/WVP-3001. Messung der Emission der Atmosphäre in 5 Spektralintervallen entlang der 22-GHz-Wasserdampflinie und in 7 Intervallen im Bereich der Sauerstoffbande (52–59 GHz), Berechnung der Temperatur- und Wasserdampfverteilung sowie Ableitung von Strukturen des atmosphärischen Flüssigwassergehaltes mit Einbeziehung des IR-Pyrometers (im Bild links oben). Foto: H. Steinhagen, MOL.

- Mikro-Regen-RADAR (24 GHz):
  Start im Oktober 1998, Bereitstellung von Niederschlagsinformationen für Korrekturverfahren bei der Temperaturmessung mit Windprofiler/RASS,
- 12-Kanal-Mikrowellenradiometer-Profiler:
  Start im November 1998 (gemeinsam mit MOP), Ableitung von Profilen für Temperatur, Wasserdampf, Flüssigwassergehalt (s. Abb. 1-39),
- GPS-Station:
  Aufbau im Dezember 1999 (gemeinsam mit MOP), Ableitung von Daten der atmosphärischen Wasserdampfsäulendicke.

Auf der Grundlage der Langzeittests (etwa 3 Jahre) des 482-MHz-Windprofiler/RASS am MOL, die auch Vergleiche mit Messungen der Routine-Radiosonde, dem Fesselballonsystem und mit Modellergebnissen einschlossen, konnte 1999/2000 die Schlussfolgerung gezogen werden, dass eine hochaufgelöste Messung von Profilen des Windes und der virtuellen Temperatur mit diesem System auch in einem operationellen aerologischen Netz möglich ist. Daraufhin wurde im DWD-Programm „Messnetz 2000“ unter wissenschaftlicher Verantwortung des MOL das Konzept für ein aerologisches Messnetz, bestehend aus Radiosonden- und Windprofiler/RASS-Stationen, für den DWD entwickelt. Schwerpunkt des MOL-Beitrags waren Arbeiten zur Absicherung der Systemverfügbarkeit und Datenqualität der Profiler-Systeme. Dafür wurden in Kooperation mit dem NOAA (**N**ational **O**ceanic and **A**tmospheric **A**dministration, USA) und NCAR (**N**ational **C**enter of **A**tmospheric **R**esearch, USA) umfangreiche Tests von Signalverarbeitungsalgorithmen unter quasi-operationellen Bedingungen am MOL durchgeführt. Weiterhin mussten geeignete Standorte in Deutschland begutachtet werden und eine fachliche Auswertung der Firmenangebote für Radarsysteme, die auf der Grundlage der technischen Konzeption des MOL vom DWD angefordert worden waren, erfolgen (s. Kap. 5).

Sachgebiet: Landoberflächenprozesse und Grenzschicht (s. Kap. 6)

Alle Messanlagen für dieses neue Lindenberger Sachgebiet mussten in den Jahren 1995 bis 2000 inhaltlich konzipiert und aufgebaut werden. Die Messungen erfolgten auf Landoberflächen, die als typisch für die norddeutsche Tiefebene gelten können. Diese Oberflächenstruktur besteht aus einer Mischung von Seengebieten mit Langsamfließgewässern, großflächigen Ackerbau- und Grünanlagengebieten, Kiefernwaldregionen und Siedlungsgebieten und ist auch in weiten Gebieten im Westen bis zur Atlantikküste sowie großen Bereichen Osteuropas bis zum Baltikum und Weißrussland anzutreffen. Damit erfüllt der Standort des MOL auch für diese Messungen die für Monitoringaufgaben sehr wichtige Forderung nach Repräsentanz. Die Messanlagen sollten die Basis für ein operationelles Monitoringprogramm von Boden- und Grenzschichtparametern als Teil der „Lindenberger Säule“ bilden und auch die für diese Forschungsrich-

tung sehr typische Durchführung von Messkampagnen ermöglichen (F. Beyrich, S. Richter, U. Weisensee; bis 10/1997 Th. Foken, bis 9/1996 W. Gerstmann). Folgende Messkomplexe wurden aufgebaut:

- Grenzschicht-Messfeld Falkenberg (GM):
  Nach der Entwicklungskonzeption für die Messstrategie (1995) wurden 1996/97 Vorexperimente zur Charakterisierung des Standortes durchgeführt (s. Abb. 1-40). 1997/98 erfolgte der Aufbau der gesamten Infrastruktur, der Messmaste und die Geräteinstrumentierung (s. Abb. 1-41). Die wichtigsten Komplexe sind ein Boden- und ein Strahlungsmessfeld, Messmaste von 10 bis 99 m Höhe und der Komplex „Indirekte Sondierung" mit SODAR/RASS, Ceilometer und 2 Szintillometern. Die in-situ-Messungen umfassen etwa 110 Sensoreinheiten.
- Mikrometeorologisches Netz in der Umgebung von Lindenberg:
  Zur Charakterisierung der Landoberflächen- und Grenzschichtprozesse über der heterogenen Oberfläche in der Umgebung des MOL wurde ein Netz mikrometeorologischer Stationen zur Messung der Energie- und Strahlungsbilanzen, von Niederschlag sowie Boden- und Luftparametern aufgebaut (ab 2000 im operationellen Einsatz). Dieses Monitoring konzentriert sich auf die Standorte „Grasslandschaft/niedrige Vegetation" (Schwerpunkt auf dem GM), „Kiefernwald/hohe Vegetation" (s. Abb. 1-42) und saisonal „See" (s. Abb. 1-43).

Eine wesentliche Unterstützung beim Aufbau der neuen Forschungslinie erhielt das MOL durch die 1995 erfolgte Beauftragung zur Durchführung des ersten DWD-internen Forschungsgroßprojektes LITFASS (**L**indenberg **I**nhomogeneous **T**errain-**F**luxes between **A**tmosphere and **S**urface: a long-term **S**tudy) mit einer intensiven konzeptionellen Abstimmung von Mess- und Modellieraufgaben (Einzelheiten s. Kap. 6).

Sachgebiet: „Lindenberger Säule" (s. Kap. 4 und 7)
Die Aufgaben dieses Sachgebietes konzentrierten sich auf die wissenschaftlich-technische Betreuung der Leistungen der Wetter- und aerologischen Station, insbesondere auf Verbesserungen bei der Routine-Radiosondenmessung und den Einsatz von Messsystemen des Wetterdienstes (z. B. Forschungs-Ceilometer). Weiterhin mussten die Messungen verschiedener Monitoringmessgeräte (z. B. Spektrometer, BSRN-Sta-

Abb. 1-43: Mikrometeorologische Messstation „Großer Kossenblatter See". Messplattform und Gittermast (links) für Gradient-, Strahlungs- und Turbulenzmessungen. Foto: G. Hollaz, MOL.

Abb. 1-40: LINEX-96/2-Prospektierungs-Experiment vor Aufbau des GM mit Profil-, Strahlungs- und Bodenmessungen (14.–26. Juni 1996). V. li.: 12-m-Mast, Fesselballon-System und mobiler Container. Foto: Th. Foken, MOL.

Abb. 1-41: Errichtung des 99-m-Messmastes auf dem GM Falkenberg, 11./12. November 1997. Foto. D. Dauß, MOL.

Abb. 1-42: Mikrometeorologische Messstation „Forst Kehrigk", 30-m-Gittermast für Profil-, Strahlungs- und Turbulenzmessungen in einem 14 m hohen Kiefernbestand. Foto: G. Hollaz, MOL.

tion), die nicht in den Sachgebieten 1 und 2 betreut wurden, für das MOL-Monitoring bearbeitet werden. Wegen der Prioritätensetzung für das Sachgebiet MOL 2 mit dem Projekt LITFASS erfolgte der o. a. Aufbau und operationelle Betrieb der umfangreichen Messtechnik und Datenverarbeitung sowie der Logistik des GM von 1995 an unter Verantwortung des Sachgebietes MOL 3. Schließlich wurden die Daten aller Messsysteme des MOL in einer spezial aufzubauenden Datenbank gesammelt und nach der Qualitätsprüfung für Nutzer bereitgestellt (U. Leiterer, W. Adam, H. Dier, M. Dzingel). Folgende Messkomplexe mussten aufgebaut bzw. betreut werden:

- Aufbau eines Präzisions-PTU-Labors:
  Bereitstellung von Mess- und Kalibrierdaten (Temperatur, Feuchte, Druck) zur Verbesserung der Feuchtesondierung mit Routineradiosonden,
- Einsatz von Spektrometermessungen zum Feuchtemonitoring:
  Ableitung von Wasserdampf-Säulenmessungen mit dem Gerät ROBAS und Aufbau einer Sternphotometermessung als Vergleichsdaten (tags und nachts) für die Routinefeuchtesondierungen (z. B. Radiosonde, Mikrowellenradiometer),
- Dauerbetrieb der Geräte ROBAS und BREWER und der BSRN-Station:
  Routinemessungen von Aerosol, Ozon, NO_2, UV-B und breitbandige Strahlungsparameter als Teil des Observatoriums-Monitoringprogramms („Lindenberger Säule"),
- Datenbank „Lindenberger Säule":
  Installation der erforderlichen Rechentechnik und Entwicklung der Betriebsprogramme, einschließlich der Zertifizierung der Datenqualität (Einzelheiten s. Kap. 7), ab 1996 Festlegung eines Datenmodells für die „Lindenberger Säule" und Inbetriebnahme des Datenbanksystems „ORACLE" mit den erforderlichen kontinuierlichen updates.

Messexperimente und internationale Aktivitäten

Die zunehmende experimentelle Ausrüstung und die Modernisierung der Logistik am MOL wurden genutzt, um mit nationalen und internationalen Kooperationspartnern Messexperimente und -kampagnen am Standort Lindenberg – sogen. LINEX **Lin**denberg **Ex**perimente – durchzuführen. In den Jahren 1993 bis 2002 fanden 19 Messexperimente statt. Hervorgehoben werden muss das LINEX „LITFASS-98". An diesem durch den LITFASS-Projektleiter (F. Beyrich) konzipierten und koordinierten Feldexperiment beteiligten sich im Sommer 1998 neben den anderen 3 DWD-Observatorien 18 Arbeitsgruppen aus Deutschland und den Niederlanden bei den Untersuchungen der turbulenten Austauschprozesse (Impuls, Wärme, Wasserdampf) über dem heterogenen Gelände innerhalb eines NWV-Modellgitterpunktes. LITFASS hatte auch erstmals (Konzept „Observation und Simulation") eine angepasste Modell-Komponente mit dem **L**ITFASS-**L**okal**m**odell LLM (Einzelheiten s. Kap. 6). Weiterhin konnte das MOL mit diesen neuen Messanlagen zwischen 1994 und 2000 auch an 18 internationalen Kampagnen zur Klimaüberwachung und beim Test neuer Messverfahren (z. B. erstes europäisches Windprofiler-Netz CWINDE-97 und CWINDE-99) mitwirken und damit seine Eignung für den Betrieb anspruchsvoller Messverfahren und bei der zeitnahen Bereitstellung qualitätsgeprüfter Daten nachweisen. Damit verbunden war eine immer stärkere Mitwirkung von Lindenberger Wissenschaftlern in internationalen Gremien. In dem europäischen Projekt COST-76 „Development of VHF/UHF wind profiles and vertical sounders for use in European observing systems" erfolgte eine außerordentlich aktive Beteiligung im Management-Komitee (H. Steinhagen) und in den Arbeitsgruppen (D. Engelbart, U. Görsdorf, V. Lehmann). Diese vom Projektträger als sehr erfolgreich eingestufte Kooperation konnte für den Anlauf eines wesentlich vom MOL initiierten Folgeprojektes COST-720 „Integrated ground-based remote-sensing stations for atmospheric profiling" genutzt werden, für das dem DWD/MOL ab 2002 die Vice-Chairmenship (D. Engelbart) übertragen wurde.

Die Erfolge des MOL bei der wissenschaftlichen Vorbereitung der Integration von bodengebundenen Fernsondierungstechniken für eine operationelle Nutzung im Wetterdienst führten auch dazu, dass der DWD im Rahmen von EUMETNET (**Eu**ropean **Met**eorological **Net**work) im Juli 2002 die Verantwortung für das europäische Projekt WINPROF zum Aufbau eines operationellen **Windprof**iler/RASS-Messnetzes in Europa erhielt und vom MOL die Funktion des internationalen Projekt-Managers (V. Lehmann) wahrgenommen wurde (s. Kap. 8). Das umfangreiche Instrumentarium des MOL für direkte und indirekte Präzisionsfeuchtesondierungen war 1997 entscheidend für den Vorschlag der WMO-WCRP in Lindenberg einer Referenzstation für das Projekt GVaP (**G**lobal Water **Va**pour **P**roject) aufzubauen (s. Kap. 8). Nach dem Aufbau des GM und der Durchführung von LITFASS-98 startete das MOL auch die internationale Mitwirkung in entsprechenden Projekten. Während des Hauptexperimentes BRIDGE im Rahmen des kontinentalen GEWEX-BALTEX (**G**lobal **E**nergy and **W**ater Cycle **Ex**periment – **Balt**ic **Ex**periment) war Lindenberg von 1999 bis 2002 eine der internationalen Referenzstationen. In dem globalen Folgeprojekt GEWEX-CEOP (**C**oordinated **E**nhanced **O**bservation **P**eriod), das der Erprobung des Prototyps eines zukünftigen globalen Erdbeobachtungssystems mit Satellitensondierungen und einem weltweiten Netz von Boden-Referenzstationen dient, wurde das MOL zusammen mit 3 weiteren europäischen Observatorien als Referenzpunkt ausgewählt (s. Kap. 8). Im Oktober 2002 startete die „First-CEOP Annual Period" mit MOL-Beteiligung (Stationsleiter: F. Beyrich, Daten-Manager: W. Adam). Bei der Verbesserung der Routine-Feuchtemessung mit den im weltweiten Messnetz am häufigsten operationell verwendeten Feuchtesensoren RS80/RS90

(U. Leiterer) wurden Korrekturalgorithmen entwickelt, die neben der aktuellen Anwendung auch für retrospektive Untersuchungen anwendbar sind (s. Kap. 4). In einem Report für die WMO-CIMO „Upper Air Working Group" (U. Leiterer, H. Dier) wurde 2000 deren weltweite Anwendung zur Verbesserung des Feuchtemonitorings, vor allem für Messhöhen mit sehr tiefen Temperaturen angeregt. Diese Arbeiten sind auch eine wichtige Aktivität der GVaP-Station Lindenberg. Eine besondere Würdigung der wissenschaftlichen Arbeiten erhielt das MOL durch den Beschluss des Exekutiv-Rates der WMO zur Verleihung des „Prof. V. Vaisala Award" an zwei Wissenschaftler des MOL. Im November 2001 erhielten U. Görsdorf und V. Lehmann diese Auszeichnung für ihre Ergebnisse bei der Verbesserung der Messgenauigkeit radioakustischer Sondierungssysteme zur Untersuchung der vertikalen Feinstruktur in der unteren Atmosphäre.

Baumaßnahmen

Parallel zu der messtechnischen Ausrüstung mussten auch alle Gebäude und die Infrastruktur der Liegenschaft modernisiert werden. Nach dem bereits Ende 1995 gestellten Antrag erfolgte von Juli 1997 bis März 1998 eine umfassende Rekonstruktion des zentralen Büro- und Laborgebäudes. Gleichzeitig wurde das historische Windenhaus – Wahrzeichen des Observatoriums seit 1905 – unter aktiver Mitwirkung der Landesbehörde für Denkmalpflege vollständig restauriert. Für die gelungene Restaurierung dieses technischen Denkmals erhielten der Architekt und der Bauherr DWD/MOL den „Denkmalpflegepreis 1999" des Landes Brandenburg (s. Abb. 1-44).

Mitten in der geschilderten intensiven Aufbauphase begannen bereits ab Ende 1996 erneut Diskussionen der Leitung des DWD über eine Reduktion der Observatoriumskapazität, die verknüpft waren mit der im Oktober 1995 erfolgten Neustrukturierung des Geschäftsbereiches Forschung und Entwicklung im DWD und den permanenten Forderungen des Ministeriums und des DWD-Vorstandes nach Einsparungsmaßnahmen. Da am Standort Potsdam erhebliche Investitionsmittel für die Rekonstruktion der Liegenschaft des MOP erforderlich waren und eine langfristige Konstanz der notwendigen Beobachtungs- und Messbedingungen in der Umgebung des MOP in Frage gestellt werden musste, konzentrierten sich die Diskussionen auf die langfristige Erhaltung der Observatoriumsstandorte am Hohenpeißenberg und in Lindenberg. Dafür wurde 1997 ein fachliches Konzept ausgearbeitet, das für das MOL die Übernahme aller experimentellen Arbeiten des MOP vorsah. Parallel dazu wurde gemeinsam mit dem MOP (K. Dehne) ein Baubedarfsplan für diese Verlagerung erstellt, der Bestandteil einer Generalplanung wurde, die zur Realisierung des veränderten Nutzungskonzeptes umfangreiche Neubau-, Grundsanierungs- und Instandsetzungsarbeiten auf der Liegenschaft des MOL beinhaltete.

Nach Ausarbeitung der vielfältigen Planungsunterlagen gemeinsam mit dem Landesbauamt und der Bereitstellung der Finanzmittel begann damit rund 60 Jahre nach der Rekonstruktion unter dem Direktorat von H. Koschmieder (s. Unterabschnitt 3.2) eine umfassende Erneuerung aller Anlagen der Liegenschaft des MOL. Die Baumaßnahmen beinhalteten den Neubau eines Funktionsgebäudes mit Messplattform für die neue Strahlungszentrale und den Neubau eines 25 m-Turmes mit Messplattform sowie die Grundsanierung der Laborgebäude 1 und 2, der Werkstatt, des Ozonmesshauses, der Sternkuppel, der Lagerhalle, der Garagen, des Wachgebäudes und des Klubhauses. Gleichzeitig erfolgte ein Aus- und Neubau von Straßen, Zuwegungen, sämtlicher interner Versorgungsleitungen, der Parkplätze, der Gesamtumzäunung und weiterer Baumaßnahmen für die Infrastruktur. Für die unbedingt erforderliche Weiterführung aller Monitoringmessprogramme mussten für mehrere Fachaufgaben, z. B. den kontinuierlichen Betrieb der BSRN-Station und der Wetter- und aerologischen Station sowie die konstante Gewährleistung der Informationsübertragung von allen Messanlagen noch zusätzliche Bauleistungen für z. T. mehrmonatige Interimslösungen erbracht werden (s. Abb. 1-45). Die schnelle Zusammenführung der Observatorien Lindenberg und Potsdam und die Aufrechterhaltung und Vervollkommnung der Messprogramme in Lindenberg waren die Eckpunkte für den zeitlichen Bauablauf aller o. g. Maßnahmen im Zeitraum von 1999 bis 2005. Im Dezember 2001 erfolgte der Start für den Neubau der „Strahlungszentrale" auf dem Kalkberg unmittelbar neben dem Windenhaus.

Abb. 1-44: Historisches Windenhaus auf dem Kalkberg. Baujahr 1905, Rekonstruktion 1997/98. (Technisches Denkmal). Foto: D. Dauß, MOL.

Abb. 1-45: Interims-Plattform für das Strahlungsmonitoring (links: BSRN-Station, Mitte: BREWER, rechts: ROBAS) Provisorium während der Bauphase von Okt. 2001 bis Mai 2003. Foto: D. Dauß, MOL.

6.4 Das Meteorologische Observatorium Lindenberg 2002 bis 2005

Auf der Grundlage mehrjähriger Diskussionen zum neuen DWD-Fachkonzept für die Forschungsobservatorien und den umfangreichen Investitionen am Standort des MOL erfolgten schließlich am 17. Juli 2002 ein Erlass des BMVBW und am 19. September 2002 die Organisationsverfügung des Präsidenten des DWD für die Neuordnung der Observatorien. Dementsprechend wurde das MOP zum 30. September 2002 auch formal aufgelöst und ab 01. Oktober 2002 die folgende Sachgebietseinteilung für das MOL in Kraft gesetzt:

MOL 1 (FELGA):
„Bodengebundene Fernsondierung", mit 2 Sachbereichen
- „Bodengebundene aktive Fernsondierung" (FELGA1),
- „Passive Fernsondierung im Mikrowellen- und Infrarotbereich" (FELGA2),

Leiter: H. Steinhagen, ab 1/2004 D. Engelbart.

MOL 2 (FELGB):
„Landoberflächenprozesse und Grenzschicht"
Leiter: F. Beyrich

MOL 3 (FELGC):
„Lindenberger Säule", mit 2 Sachbereichen
- „Wetterfachdienst" (FELGC1),
- „Langzeitbeobachtung" (FELGC2),

Leiter: U. Leiterer

MOL 4 (FELGD):
„Strahlungsflüsse"
Leiter: M. Weller

Mit der Bildung der neuen Forschungslinie „Strahlung" und der Integration der experimentellen Forschungen auf dem Gebiet der passiven Fernsondierung wurden in Lindenberg die Voraussetzungen für ein umfassendes Monitoring aller relevanten physikalischen Parameter und Prozesse in der vertikalen Atmosphärensäule vom Erdboden bis etwa 35 km Höhe hergestellt (s. Abschnitt 6.2). Die schwierige Entscheidung zur Beendigung der 110-jährigen meteorologischen Forschungen am traditionsreichen Standort Potsdam war dabei nicht vordergründig nur durch die permanenten Sparzwänge bestimmt. Vielmehr wurde mit der Installation aller experimentellen Observatoriumsaufgaben in Lindenberg der zwingenden internationalen Tendenz Rechnung getragen, das Atmosphärenmonitoring für alle Fragen der Wetter- und Klimaforschung an wenigen, repräsentativen und umfassend instrumentierten Forschungsinstitutionen zu konzentrieren. Diese so genannten Referenzstationen arbeiten bei der globalen Überwachung in thematisch orientierten Netzwerken zusammen und müssen qualitätsgeprüfte Datensätze für operationelle Beratungszwecke und für die Forschung bereitstellen. Mit der vollständigen Umsetzung des wissenschaftlichen und ingenieur-technischen Personals konnten die langjährigen Erfahrungen des Potsdamer Observatoriums erhalten und für einen raschen Arbeitsbeginn am neuen Standort genutzt werden. Nach dem Abschluss der Bauarbeiten an der Strahlungszentrale erfolgte ab Mai 2003 die Instrumentierung der neuen Messplätze und Labors. Im Rahmen einer Veranstaltung des DWD-Vorstandes eröffnete der Bundesminister für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen M. Stolpe zusammen mit dem DWD-Präsidenten U. Gärtner am 23. September 2003 den Neubau der „Strahlungszentrale" (s. Abb. 1-46). Das auf dem Kalkberg gelegene Gebäude verfügt über eine umfassende Horizontfreiheit und entspricht mit der großzügigen Anordnung von Mess-, Datenverarbeitungs- und Laboreinrichtungen unter einem Dach höchsten internationalen Standards für meteorologische Strahlungsmessungen (s. Abb. 1-47). Mit dem Neubau der Strahlungszentrale wurden in Lindenberg optimale Voraussetzungen geschaffen, um die internationalen Verpflichtungen des MOL als Re-

Abb. 1-46: Eröffnung der „Strahlungszentrale", Lindenberg, 23. September 2003, M. Stolpe, Bundesminister für Verkehr-, Bau- und Wohnungswesen; U. Gärtner, Präsident des DWD; J. Neisser, Leiter des MOL; M. Zalenga, Landrat LOS (von links). Foto: D. Frömming, DWD.

Abb. 1-47: „Strahlungszentrale" des MOL, Sicht von West, links oben: Windenhaus, vorne: Antenne der Radiosondenstation. Foto: W. Mausolf, Frankfurt (Oder).

ferenzlabor „Strahlung“ für die Regionalassoziation VI (Europa) der WMO sowie als Referenzstation im globalen BSRN-Messnetz des WCRP in höchster Qualität wahrzunehmen (s. dazu Kap. 3 und 8).

Auf dem Dach der Strahlungszentrale befindet sich eine etwa 275 m² Messplattform mit zahlreichen schwingungsfreien Gerätestandplätzen. Kernstück sind etwa 30 Messsysteme für das breitbandige und spektrale Strahlungsmonitoring vom UV-B bis zur Wärmestrahlung (s. Abb. 1-48). Zusätzlich wurden ausreichend Messplätze für Gerätesysteme von nationalen und internationalen Kooperationspartnern für spezielle Mess- und/oder Kalibrierkampagnen vorbehalten. Auf der Messplattform sind auch die Gerätesysteme zur passiven Fernsondierung (Mikrowellenradiometer-Profiler, Infrarot-Fourier-Spektrometer) installiert. Unter der Messplatzform befinden sich in einer Gebäudeetage die Anlagen zur Messwerterfassung und Informationsaufbereitung. Eine weitere Etage ist mit umfangreichen Kalibrier- und Laborräumen ausgestattet. Im Untergeschoss ist die Haustechnik, z. B. zur Klimatisierung aller Räume untergebracht. Für die erforderlichen präzisen Kalibrier- und Messarbeiten wurden auf insgesamt 145 m² Fläche sogen. „Schwarzlabore“ installiert. Unmittelbar neben der Strahlungszentrale befinden sich die Standplätze für den LIDAR-Container und die Kuppel für Sternphotometermessungen. Bereits ab 2004 startete die Strahlungszentrale umfangreiche Messprogramme zur Betreuung des nationalen Strahlungsnetzes, zur Verbesserung der Aufgaben der BSRN-Station und zur Bereitstellung belastbarer solarer UV-Messungen für klimatologisch relevante Zeitintervalle.

Abb. 1-48: Messplattform der „Strahlungszentrale“. Strahlungsmonitoring und Kalibrierung von Geräten im nationalen und internationalen Strahlungsnetz, Sicht von Süd, im Hintergrund links: Neubau des 25 m-Messturmes, im Hintergrund Mitte: Dach des Windenhauses. Foto: W. Mausolf, Frankfurt (Oder).

Neben der Aufnahme des kompletten Strahlungsmonitorings wurde auch in den übrigen MOL-Sachgebieten im letzten Zeitabschnitt vor dem 100-jährigen Jubiläum eine deutliche Komplettierung der Messeinrichtungen erreicht (s. Kap. 4, 5, 6). Davon betroffen waren folgende Forschungsaufgaben:

- Installation eines 35,5 GHz-Wolkenradars auf dem Messfeld „Indirekte Sondierung“ (Messbetrieb ab November 2003),
- Wiederaufbau des FTIR-Spektrometers EISAR (**E**mission **I**nfrared **S**pectrometer for **A**tmospheric **R**esearch) nach umfassender Erneuerung der Hard- und Software (ab Januar 2004), s. Abb. 1-49,
- Inbetriebnahme eines RAMAN-Wasserdampf-LIDAR (Messbetrieb ab 2. Halbjahr 2005 vorgesehen),
- Ausbau des Landoberflächen- und Grenzschichtmonitorings an den Dauermessplätzen für niedrige (GM) und hohe (Wald) Vegetation durch Modernisierung der Sensorik im/am Boden und an Masten sowie Ausbau der indirekten Verfahren (Szintillometrie, SODAR/RASS),
- Komplettierung des PTU-Kalibrierlabors für Präzisionsmessungen (Radiosonden-Sensorik).

Abb. 1-49: FTIR (**F**ourier-**T**ransform-**I**nfra**r**ed)-Spektrometer EISAR, Messung der spektralen Strahldichte zwischen 600 und 3000 cm^{-1} mit hoher spektraler Auflösung; Bestimmung der Temperatur- und Wasserdampfverteilungen (weitere Spurenstoffe möglich). Anmerkung: Spektrometer ist durch Gehäuse geschützt, Dachhaube öffnet sich automatisch zur Messung. Foto: D. Engelbart, MOL.

Den aktuellen Stand der MOL-Messsysteme für das Monitoring der „Lindenberger Säule“ zeigt Abb. 1-50. Die Expertise des MOL für den Einsatz moderner Messsysteme ist Grundlage für die wissenschaftliche Verantwortung beim Betrieb und der Erneuerung ausgewählter operationeller Messnetze des DWD im Programm „Messnetz 2000“. Das betrifft die Arbeiten zur Qualitätssicherung für Geräte und Messergebnisse des aus 36 Stationen bestehenden nationalen Strahlungsnetzes (s. Kap. 3) und die zunehmende Mitwirkung für das modernisierte aerologische Messnetz. Dabei werden für das Radiosondennetz des DWD alle Recherchen und Tests für neue Sondentypen und Aufstiegstechnik (Autolauncher, Ballone, Fallschirme usw.) unter wissenschaftlicher Verantwortung des MOL durchgeführt (s. Kap. 4). Für den Aufbau des aerologischen DWD-Subnetzes mit 3 Windprofiler/RASS, einer absoluten Neuerung für europäische Wetterdienste, liegt seit Aufbau der ersten 482-MHz-Anlage im Herbst

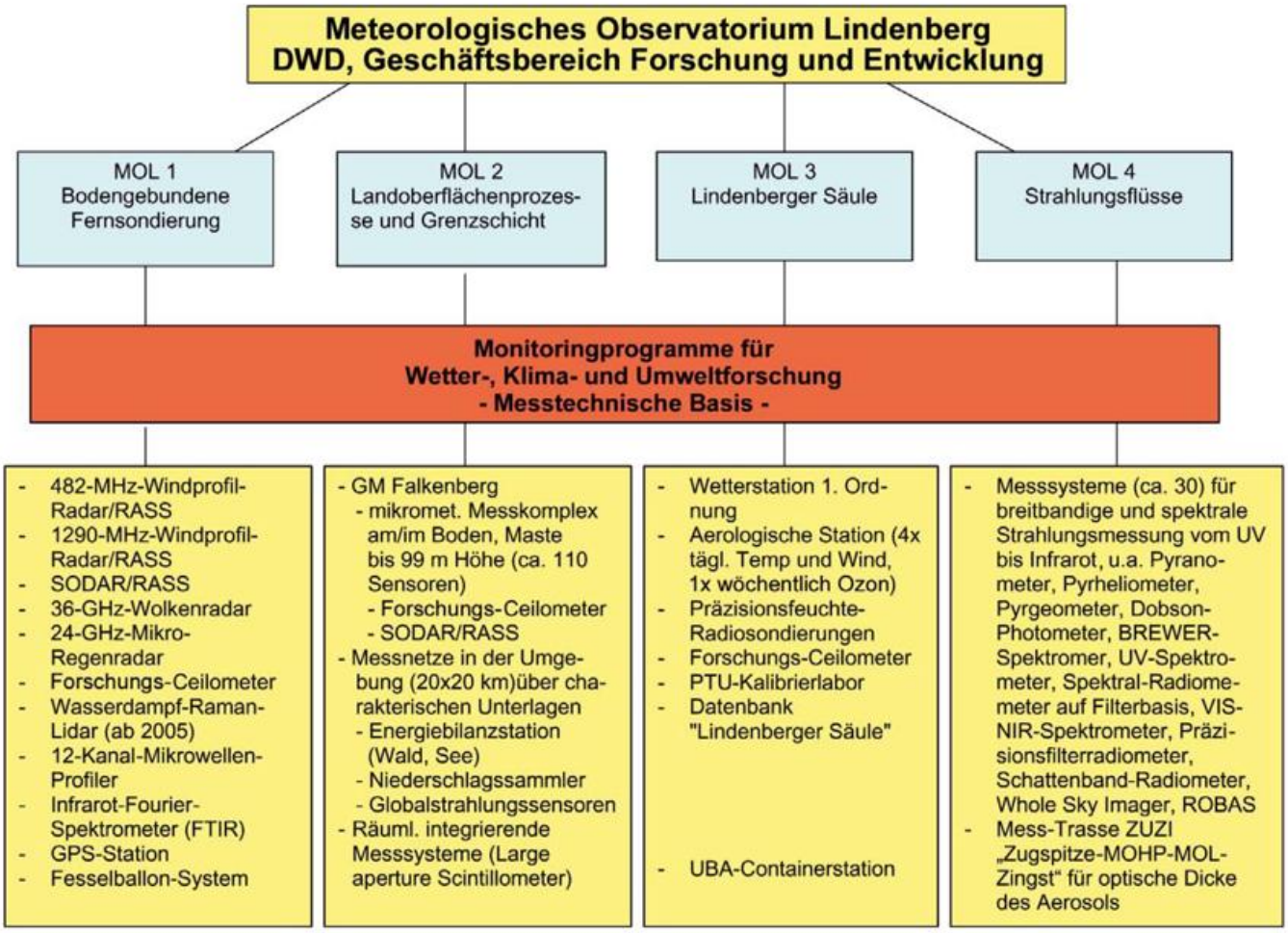
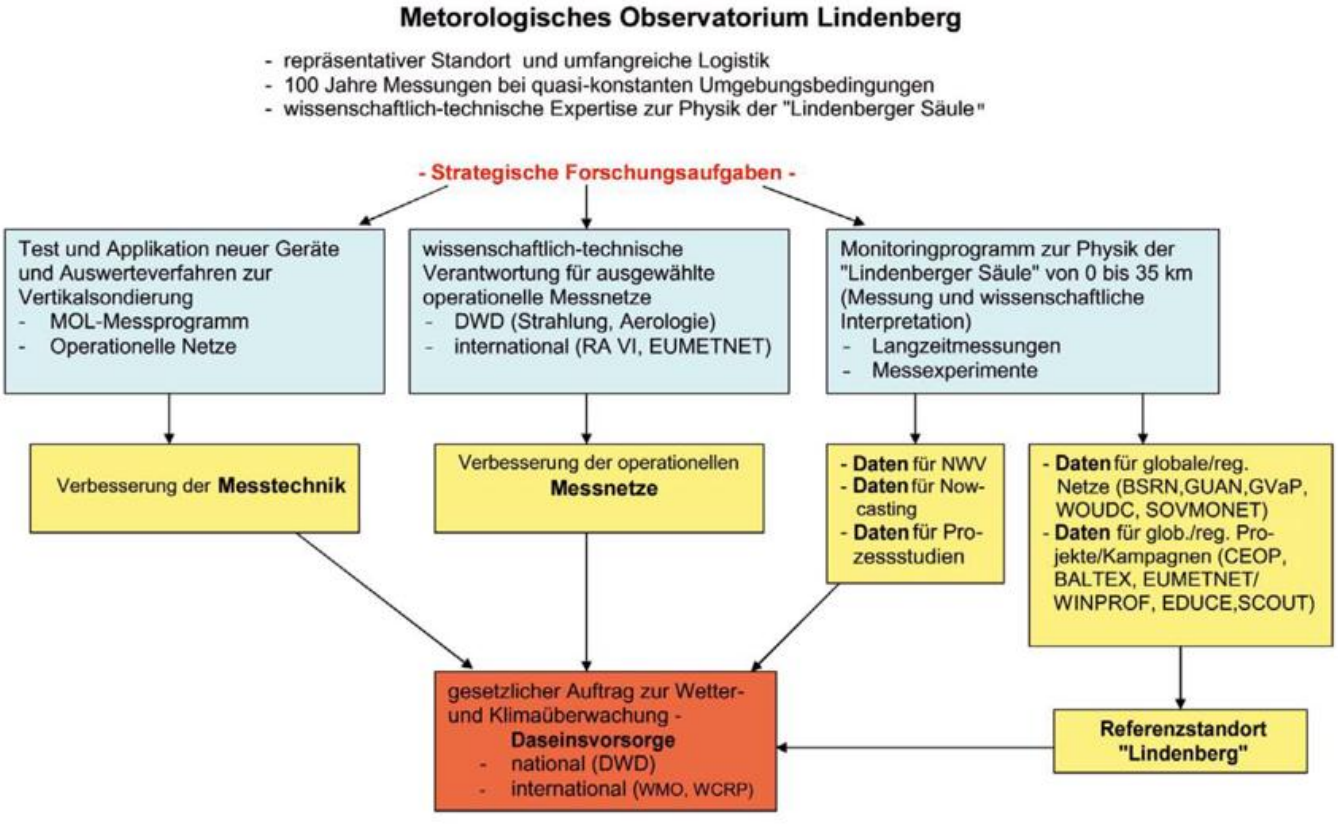


Abb. 1-50: Meteorologisches Observatorium Lindenberg – Struktur und messtechnische Ausrüstung – Stand: Mitte 2005.



Abbt. 1-51: Meteorologisches Observatorium Lindenberg – Strategische Forschungsaufgaben.

2003 am Standort Ziegendorf (Mecklenburg-Vorpommern) die umfassende fachliche Betreuung beim MOL. Im Frühjahr 2004 wurde ein zweiter Profilerkomplex in Nordholz (Schleswig-Holstein) installiert, ein dritter wird 2005 in Bayern aufgebaut (s. Kap. 5). Neben der Mitwirkung an diesen operationellen Messnetzen werden die Ergebnisse aus dem MOL-Monitoringnetz zunehmend in Wetter- und Klimamodellen verwendet (s. Abb. 1-51). So konnte die Datenverfügbarkeit der 3 aktiven Fernsondierungsverfahren Windprofiler/RASS und SODAR/RASS auf über 90 % gesteigert und die Datenqualität der Profildaten von Wind und virtueller Temperatur deutlich erhöht werden. Diese Profildaten fanden Eingang in den numerischen Vorhersagesystemen der Wetterdienste in Deutschland, Großbritannien, Frankreich und des europäischen Zentrums ECMWF. Die komplexen Datensätze des GM werden für Vergleiche mit Modellergebnissen des DWD-Lokal-Modells LM und zur Modellparameterisierung genutzt. Ein Beispiel für den Einsatz der komplexen Lindenberger Daten in internationalen Projekten ist die Verwendung der mehrjährigen CEOP-Datensätze zur Evaluierung globaler Klimamodelle (s. Kap. 6 und 8). Damit zusammenhängend ist die deutliche Erweiterung der Rolle des MOL als internationale Referenzstation in einer Vielzahl von Projekten und Messnetzen (s. Kap. 8). Das betrifft auch die Mitwirkung in europäischen COST-Experimenten (COST-720, COST-723, COST-726) und die Übertragung von entsprechenden Verantwortlichkeiten an MOL-Wissenschaftler (Vice-Chair bzw. Management-Komitee: D. Engelbart, U. Leiterer, U. Feister).

Die wissenschaftlichen Ergebnisse und die logistischen Voraussetzungen wurden für weitere LINEX-Experimente genutzt. Hervorzuheben ist das Experiment LINEX-LITFASS 2003 (Leitung F. Beyrich). Dabei wurden im Rahmen der Forschungsprogramme zur Atmosphären- und Klimaforschung (AFO-2000, DEKLIM) des Bundesforschungsministeriums unter Beteiligung von 13 Teams aus 3 Ländern konsistente Datensätze für Wechselwirkungsprozesse (hier Verdunstung) zwischen Atmosphäre und heterogener Erdoberfläche zur Modellsimulation und -validierung als ein „Flux composite" hergestellt. Neben den langen Reihen für Profile von Temperatur, Feuchte und Wind und dem langfristig angelegten Grenzschichtmonitoring sind auch die seit Dezember 1974 existierenden Lindenberger Ozonmessungen von großer Bedeutung. Bei Kombination mit den Berliner Ozonsondierungen zwischen November 1966 und Januar 1973 liegt damit für den Brandenburger Raum eine der längsten europäischen Ozonreihen von fast 40 Jahren vor. Mit diesen Messungen beteiligt sich das MOL seit dem Programm EASOE (s. Abschnitt 6.2) kontinuierlich an allen europäischen Folge-Ozonexperimenten (SESAME, THESEO, SOLVE, QUOBI, s. Kap. 8). Die seit 1991 zunehmend ausgebaute Aerosol-Mess-Trasse Zingst-MOL-MOHp-Zugspitze wurde unter der Bezeichnung ZUZI als „contributing network" Teil des GAW-Programmes (**G**lobal **A**tmospheric **W**atch). Das Experiment LINEX-LAUNCH 2005 führt im Rahmen von COST-720 am Standort Lindenberg eine Vielzahl von Fernsondierungstechniken zur Ableitung repräsentativer Wasserdampfprofile zusammen.

Die international kontrovers geführten Diskussionen über langfristige Veränderungen des Klimas und der gesamten Umwelt haben das Interesse an belastbaren Messdaten für möglichst lange Zeitabschnitte unter kontrollierbaren Messbedingungen sowohl in der Klimaforschung wie auch der gesellschaftlichen Öffentlichkeit ansteigen lassen. Das Lindenberger Messprogramm lässt entsprechende Trenduntersuchungen zu. Erste Ergebnisse der seit etwa 2001 zunehmend durchgeführten Trendanalysen sind im Kap. 7 aufgeführt.

Das Ende der 90er Jahre gestartete umfangreiche Erneuerungsprogramm der MOL-Liegenschaft wurde nach dem Bau der Strahlungszentrale (2003) mit dem Neubau eines 25-m-Messturmes (2004) und der Rekonstruktion von Labor 1 (2003), Labor 2 (2004), der Garagen (2004), des Wachgebäudes (2004), der Werkstatt (2005), des Ozonhauses (2005), des Klubhauses (2005) und der Lagerhalle (2005/2006)) nahezu abgeschlossen.

Am 30. April 2004 beendete J. Neisser durch Erreichen der Pensions-Altersgrenze seine Tätigkeit als Leiter des MOL. Zum 01. Juli 2004 wurde F. H. Berger als neuer Leiter des MOL berufen. F. H. Berger war vorher als habilitierter geschäftsführender Oberassistent am Institut für Hydrologie und Meteorologie der TU Dresden/Tharandt tätig. Seine wissenschaftlichen Arbeiten konzentrierten sich dort auf die Nutzung der Satellitenfernerkundung bei der Diagnose von Klima- und Wetterprozessen, insbesondere für den Wasserkreislauf am Boden und in der Atmosphäre. Diese Spezialisierung wird zu einer Erweiterung des Lindenberger Forschungsprofils beitragen.

Literatur

ASSENG, E., 1975: Zur Theorie des Trägheitsfehlers der Temperaturmessung in der freien Atmosphäre. *Z. f. Met.* **25**, 374-383.

ASSENG, E., 1980: Die Automatisierung der Auswertung von Radiosondenmessungen im Meteorologischen Dienst der DDR. *Z. f. Met.* **30**, 270-278.

ASSENG, E.; 1982: Untersuchungen zur Ermittlung des Wärmeaustausches zwischen Thermistoren und verdünnter Luft. *Abh. des MD* **127** (Bd. XVII), Berlin: Akademie-Verlag, 78 S.

ASSMANN, R. 1915: Das Königlich Preußische Aeronautische Observatorium Lindenberg. *Friedrich Vieweg & Sohn*, Braunschweig, 284 S.

DUBOIS, P., 1959: Über die Notwendigkeit der Durchführung aerologischer Aufstiege mit modernen gefesselten und ungefesselten Ballonen. Lindenberg, Archiv des MO, 28 S.

DUBOIS, P., 1967: Höchstaufstiege in der Stratosphäre. Lindenberg, Archiv des MO, 26 S.

DUBOIS, P., 1993: Das Observatorium Lindenberg in seinen ersten 50 Jahren, 1905–1955. Offenbach a. M.: Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes „Geschichte der Meteorologie in Deutschland", Bd. 1, 374 S. (Manuskript etwa 1957 fertiggestellt).

GERNANDT, H., P. GLÖDE, U. FEISTER, G. PETERS, B. THEES, 1989: Vertical distributions of Ozone in the lower Stratosphere over Antarctica and their relations to the spring depletion. *Planet. Space Sci.* **37**, 915-933.

GLÖDE, P., H. GERNANDT, 1988: Zum Einsatz meteorologischer Raketen für die Sondierung der mittleren Atmosphäre. Archiv des MO, 14 S.

KÄSE, H., R. ZIEMANN; 1992: Beiträge zur Geschichte der Landeswetterdienste (1945–1949) – Braunschweig – Interne Dokumentation. Deutscher Wetterdienst, 80 S.

KÄSE, H., R. ZIEMANN, 1994: Chronik des Meteorologischen Dienstes (1987–1990), Ergänzungsheft, 40 S., 6 Anlagen. Interne Dokumentation Deutscher Wetterdienst, Potsdam, 24 S.

KÖRBER, H.-G., 1993: Die Geschichte des Meteorologischen Observatoriums Potsdam. Offenbach a.M.: Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes „Geschichte der Meteorologie in Deutschland", Bd. 2, 129 S.

KÖRBER, H.-G., 1997: Die Geschichte des Preußischen Meteorologischen Instituts in Berlin. Offenbach a.M.: Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes „Geschichte der Meteorologie in Deutschland", Bd. 3, 71 S.

LEITERER U., K.-H. SCHULZ, 1987: Experimental data on Aerosol optical thickness in Antartica in sommer 1984/85. *Z. f. Met.* **35**, 315-321.

LEITERER, U., M. WELLER, 1988: Sunphotometer BAS/ABAS for Atmospheric Research. WMO/TD - No. 222, 21-26.

LÜBKEN, F.-J, 2005: Eisteilchen in 80–90 km Höhe: Indikatoren für die niedrigsten Temperaturen in der Erdatmosphäre. *Promet*, Jahrg.**31**, Nr.1, 19-24.

MARKGRAF, H., U. LEITERER, M. WELLER, 1976: Entwicklungsarbeiten zur Einführung eines meteorologischen Raketensondierungssystems mit kleinem Sicherheitsgebiet. Dissertationsschrift am Fachbereich Geo- und Kosmoswissenschaften der AdW, Berlin, 345 S.

MÜCKET, G., 1956: Über einen neuen registrierenden Sichtmesser. *Abh. des MD* **39** (Bd. V), Akademie-Verlag, Berlin, 36 S.

MÜCKET, G., 1969: Messungen zur spektralen Extinktion des Lichts in der bodennahen Atmosphäre im Bereich von 385 bis 1000 nm. Dissertationsschrift an der Humboldt-Universität, Berlin, 84 S.

RINK, J., 1961: Thermistore und ihre Anwendung in der Meteorologie. *Abh. des MD* **63** (Bd. VIII), Akademie-Verlag, Berlin, 58 S.

RINK, J., 1962: Anwendungen der Radartechnik insbesondere in der Meteorologie. *Abh. des MD* **65** (Bd. IX), Akademie-Verlag, Berlin, 63 S.

RINK, J., 1964: Messprobleme bei Radiosondierungen in großen Höhen. *Z. f. Met.* **17**, 171-177.

RINK, J., 1970: Erfahrungen mit Thermistoren (Langzeitstabilität). *Z. f. Met.* **21**, 296-299.

RINK, J., 1974: Zur Temperaturmessung in großen Höhen mittels Halbleiter. *Z. f. Met.* **24**, 5-15.

SCHULZ, K.-H., R. STOLTE, 1979: Untersuchungen zu einer meteorologischen Raketensonde für das Sondierungssystem MMR 06-Dart. Dissertationsschrift an der Fakultät für Mathematik, Physik und Technische Wissenschaften der Universität Rostock, 246 S.

SCHULZ, K.-H., U. LEITERER, 1987: Spektralfotometer BAS-M mit Mikrorechner und dessen Erprobung unter antarktischen und tropischen Bedingungen. *Z. f. Feinger.* **36**, 106-108.

STEINHAGEN, H., 1981: Automatisches Erfassungssystem AES-1 für Sondierungsdaten. *radio fernsehen elektronik* **30**, 383-385.

STEINHAGEN, H., 1986: Digitale Radiosonde. Patentschrift 235 340 A1, G 01 W, 12.03 1985, 13 S.

STEINHAGEN, H., 2005: Der Wettermann – Leben und Werk R. Aßmanns in Dokumenten und Episoden, etwa 400 S., Findling-Verlag Neuenhagen (im Druck).

STEINHAGEN, H., L. FREIGANG, G. PETERS, 1987: Schaltungsanordnung zur Übertragung von atmosphärischen Spurengasmesswerten mit einer Radiosonde. Patentschrift 265 533 A3, G 08 C, 13.03.1987; 5 S.

STEINHAGEN, H., H. DIER, 1991: Die computergestützte Auswertung von Radiosondenmessungen am Beispiel des Systems MARZ-2/Meteorit. *Z. f. Met.* **41**, 366–384.

WEGE, K., 2002: Die Entwicklung der meteorologischen Dienste in Deutschland. Offenbach a.M.: Selbstverlag „Geschichte der Meteorologie in Deutschland" Bd. 5, 366 S.

WELLER, M., U. LEITERER, 1988: Experimental Data on Spectral Aerosol Optical Thickness and its Global Distribution. *Contr. Atmos. Phys.* **61**, 1-9.

Wissenschaftsrat der BRD, 1991: Umweltforschung in den neuen Ländern. Zwischenbericht und erste Empfehlungen vom 5.7.1991, Köln, (Drs. 321/91).

Wissenschaftsrat der BRD, 1991: Stand und Perspektiven der Umweltforschung in den neuen Ländern. Zweiter Zwischenbericht vom 15.11.1991, München, 74 S. (Drs. 463/91).

Ausgewählte Periodika:

- „Ergebnisse und Arbeiten" (Lindenberger Jahrbuch) des (Königlich) Preußischen Meteorologischen Observatoriums bei Lindenberg
  Braunschweig, Bd. I bis XVII, 1906–1932
- Tätigkeitsberichte des PMI für die Jahre 1891–1906, 1932, 1933
- Tätigkeitsberichte des Reichsamts für Wetterdienst für die Jahre 1934 bis 1938
- „Beiträge zur Physik der freien Atmosphäre" gegr. von R. Aßmann und H. Hergesell
  Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft, Bd. 1 bis 28, 1904–1945
- Jahresberichte des DWD 1990 bis 2004, Selbstverlag des DWD, Offenbach a. M.
- Jahresberichte „Meteorologische Observatorien" 1995 bis 2004, Selbstverlag DWD, Geschäftsbereich FE, Offenbach a. M.

promet, Jahrg. 31, Nr. 2–4, 115-118 (Oktober 2005)
© Deutscher Wetterdienst 2005

G. ADRIAN, H. GRAßL

2 Die Rolle der Observatorien heute

The role of observatories today

Zusammenfassung
Unter Hinweis auf die speziellen Beobachtungssysteme, die spezifische Infrastruktur und die Expertise bei der wissenschaftlichen Auswertung der gewonnenen Messdaten über physikalische und chemische Prozesse in der Atmosphäre werden die Aufgaben der beiden meteorologischen Observatorien des Deutschen Wetterdienstes dargestellt. Dazu gehören wesentliche Beiträge zur globalen Klimaüberwachung, zum Betrieb und der Verbesserung von nationalen und internationalen Messnetzen und zur Weiterentwicklung der Wettervorhersage.

Abstract
The tasks of the Meteorological Observatories of Deutscher Wetterdienst are presented referring to the specialised observing systems, the infrastructure and experiences in evaluating physical and chemical processes in the atmosphere from observations. Their contributions to global climate monitoring, to operation and improvement of national and international observing systems and to development of weather forecasting are briefly described.

1 Einführung

Die Komplexität der Vorgänge in der Atmosphäre und ihre Bedeutung für unsere Sicherheit zwingen zur dauerhaften Beobachtung, um erstens warnen zu können, aber auch um über erhöhtes Prozessverständnis die numerischen Modelle zur Wettervorhersage und zur Klimaentwicklung weiter zu verbessern. Die meteorologischen Messnetze einschließlich der meteorologischen Satelliten sind daher auch ein Teil der Frühwarnsysteme der Menschheit. Ohne sie wäre beispielsweise die Debatte über anthropogene Klimaänderungen ohne solide Basis. Im Folgenden soll deshalb der Beitrag der Observatorien als dem innovativstem Teil der Beobachtungssysteme besonders beleuchtet werden.

Die meteorologischen Observatorien des Deutschen Wetterdienstes (DWD) sind neben den Forschungsgruppen zur Verbesserung der Wettervorhersage Bestandteile des Geschäftsbereiches Forschung und Entwicklung. Im Rahmen der gemeinsamen Arbeitsstrategie „Simulation und Observation" erfüllen die Observatorien eigenständige Beiträge im Rahmen der nationalen und internationalen Verpflichtungen des DWD zur Wettervorhersage und Klimaüberwachung. Kennzeichen der Meteorologischen Observatorien Hohenpeißenberg und Lindenberg sind dabei zum einen der dauerhafte Betrieb eines speziellen Beobachtungssystems und zum anderen eine wissenschaftliche Auswertung der gewonnenen Beobachtungsdaten als ein wesentliches Hilfsmittel zur Qualitätssicherung. Ziel ist die kurz- und langfristige Überwachung der Struktur und Zusammensetzung der Atmosphäre, wie im § 4 des Gesetzes über den Deutschen Wetterdienst die Aufgabe der Klimaüberwachung definiert ist. Vergleichbare Funktionen innerhalb des Deutschen Wetterdienstes haben das *„**G**lobal **P**recipitation **C**limatology **C**entre GPCC"* (Weltzentrum für Niederschlagsklimatologie), das *„**G**lobal **C**ollecting **C**entre for Marine Observations GCC"* oder auch die „**S**atellite **A**pplication **F**acility for **C**limate **M**onitoring (CM-SAF)". Alle Funktionen zeichnen sich durch die Kombination Datengewinnung und wissenschaftliche Basisauswertung als Qualitätssicherung aus. Damit trägt der Deutsche Wetterdienst zum internationalen System der WMO zur globalen Überwachung des Klimas wesentlich bei.

Während GPCC, GCC oder CM-SAF überwiegend auf verfügbare Systeme der Datengewinnung (Messnetze, Schiffsbeobachtungen, Wettersatelliten) zurückgreifen, zu deren Betrieb der DWD ebenfalls erheblich beiträgt, werden an den beiden meteorologischen Observatorien technisch aufwendige Beobachtungssysteme selbst betrieben, die oft einmalig in Deutschland, z. T. auch in Europa oder gar weltweit, sind. Dazu ist spezielles Wissen und eine spezielle Infrastruktur erforderlich, die auch zur Unterstützung der Messnetze, zur Weiterentwicklung der Wettervorhersage und als Infrastruktur für die Atmosphärenforschung durch universitäre und außeruniversitäre Forschungseinrichtungen genutzt werden.

2 Klimaüberwachung

Die Klimaüberwachung als kurz- und langfristige Überwachung des Zustandes und der Zusammensetzung der Atmosphäre (§ 4 DWD-Gesetz) erfordert eine Erfassung aller relevanten zeitlichen und räumlichen Skalen der Atmosphäre und der Erdoberfläche. Ziel der Wetterüberwachung ist dagegen das Erkennen von wetterwirksamen Phänomenen, um vor ihnen lokal und regional warnen zu können. Ein Ergebnis der *Wetterüberwachung* wäre beispielsweise, dass jetzt an einem bestimmten Ort ein Gewitter auftritt. Ein Er-

gebnis der *Klimaüberwachung* wäre dagegen die Aussage, dass an dem betreffenden Ort das Phänomen Gewitter mit einer bestimmten Häufigkeit auftritt und ob diese Häufigkeit sich geändert hat. Kennzeichen einer solchen Aussage ist also die Verknüpfung sehr unterschiedlicher Zeit- und Raumskalen. Daraus folgt, dass für die Wetter- und Klimaüberwachung die zugrunde liegenden Beobachtungssysteme die gleichen räumlichen und zeitlichen Skalen abdecken müssen. Die Klimaüberwachung benötigt zusätzlich den nachhaltigen Betrieb des Beobachtungssystems und die sichere Bereitstellung der Beobachtungsdaten auch in der Zukunft.

Für eine Klimaüberwachung können also zunächst die Werkzeuge und Beobachtungen der Wetterüberwachung eingesetzt werden. Das Ergebnis ist eine auf Phänomene bezogene, beschreibende Klimatologie. Sie dient zusätzlich für die Bewertung von Wetterereignissen, für die Bemessung technischer Systeme zur Abwehr Wetter bedingter Schäden und Gefahren und zu deren Steuerung. Alle Bereiche im täglichen Leben, der Wirtschaft und Gesellschaft, die durch Wetter beeinflusst werden können, nutzen wenigstens implizit die Ergebnisse der Phänomen orientierten Klimatologie. Notwendiges, unverzichtbares Hilfsmittel sind dauerhaft betriebene Datenbanken wissenschaftlich geprüfter meteorologischer Beobachtungen (s. Kap. 7), eine Aufgabe, die mit der täglich wachsenden Datenmenge technisch immer aufwendiger wird. Die Übertragung der Daten auf neue Datenträger bzw. Datenverarbeitungstechnologien muss ebenfalls immer sichergestellt werden. Nach wie vor liegen die Daten vieler meteorologischer Beobachtungen nur auf Papier ohne Sicherungskopie vor.

Mit dem zunehmenden physikalischen Verständnis über das Klimasystem und seiner Veränderung wächst die Anforderung zusätzliche Klimavariablen zu beobachten, die nicht von den bestehenden Messnetzen für die Wetterüberwachung und Wettervorhersage erfasst werden. Es ist sicher einsichtig, dass aus der Erkenntnis der Wirkungsweise des Treibhauseffektes der Atmosphäre sofort die Notwendigkeit folgt, die räumliche und zeitliche Verteilung der klimawirksamen Spurengase in der Atmosphäre zu beobachten und zu überwachen. Diese Aufgabe wird in Deutschland im Rahmen des *„**G**lobal **A**tmosphere **W**atch (GAW)“* Programms der WMO vom Meteorologischen Observatorium Hohenpeißenberg des Deutschen Wetterdienstes gemeinsam mit dem Umweltbundesamt durch den Betrieb der GAW-Globalstation Zugspitze – Hohenpeißenberg wahrgenommen. Das GAW-Messprogramm der WMO wird an weltweit mehr als 200 Regionalstationen und 25 Globalstationen durchgeführt. Die Globalstationen, wie Zugspitze – Hohenpeißenberg, dienen als Referenz und führen technisch besonders anspruchsvolle Messungen durch. Auf Grund der Anforderungen an das GAW-Programm, die durch immer detailliertere Erkenntnisse der Klimaforschung getrieben werden, sind die Messungen auf Dauer mit den bestmöglichen Messverfahren an den Grenzen der Messtechnik durchzuführen. Ziele des GAW-Programms sind die Bereitstellung verlässlicher und möglichst vollständiger Beobachtungen des chemischen und physikalischen Zustandes der Atmosphäre auf globaler und regionaler Skala, die Bereitstellung von Daten für die Atmosphärenforschung zur Vorhersage zukünftiger Zustände der Atmosphäre, sowie die Bereitstellung von Erkenntnissen zur Politikberatung. Das GAW-Programm ist gleichzeitig die Komponente für Atmosphärenchemie im *„**G**lobal **C**limate **O**bserving **S**ystem (GCOS)“*.

Der Beitrag zu GAW ist ein typisches Beispiel für die Aufgaben der meteorologischen Observatorien im Deutschen Wetterdienst, nationale Beiträge zum internationalen System der Klimaüberwachung zu leisten. Weitere wichtige Programme sind die regelmäßige Ozonsondierung in Hohenpeißenberg und Lindenberg als Beitrag zur Überwachung des stratosphärischen Ozons und die Beteiligung am GEWEX-Programm *„**G**lobal Water **Va**pour **P**roject (GVaP)“* durch das Observatorium Lindenberg (s. Kap. 5 und 8). In diesem Programm soll mit hoher Genauigkeit und hoher Redundanz durch Einsatz sehr unterschiedlicher Messverfahren die räumliche und zeitliche Variabilität des Wassers in allen Aggregatzuständen in der Atmosphäre erfasst werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Wasserkreislauf ganz maßgeblich die Antriebe des Klimasystems bestimmt und dass der Wasserdampf das wichtigste Treibhausgas in der Atmosphäre ist. Ein weiteres Beispiel ist die Integration des Meteorologischen Observatoriums Lindenberg in das *„**B**aseline **S**urface **R**adiation **N**etwork“* (BSRN), ein Teilprojekt von GEWEX, das jüngst Teil von GCOS geworden ist (s. Kap. 3).

Diese Programme werden in den folgenden Beiträgen genauer vorgestellt (s. Kap. 8). Information über alle hier genannten Programme sind unter http://www.wmo.ch erhältlich. Gemeinsame Eigenschaft aller dieser Programme ist, dass durch die wissenschaftlich begründeten Anforderungen an die Messgenauigkeit spezielle, hochempfindliche Messsysteme dauerhaft eingesetzt werden müssen. Das erfordert neben einer langfristig belastbaren Infrastruktur vor allem auch ein internationales Niveau der Forschung. Alle Anforderungen werden von den beiden Observatorien des DWD erfüllt und sind in der erforderlichen Dauerhaftigkeit auch nur im Rahmen dieser Forschungsstrukturen realisierbar.

Die in den beispielhaft genannten Programmen der WMO zur globalen Überwachung des Klimasystems gewonnenen Daten stehen natürlich in internationalen Datenbanken zur wissenschaftlichen Auswertung durch Forschungsinstitute weltweit bereit. Neben der beschreibenden, mehr phänomenorientierten Analyse zur Klimaüberwachung steht bei diesen Programmen

ein stärker prozessorientierter Ansatz zur Klimaüberwachung im Vordergrund. Hier geht es also stärker um das Verständnis des Zusammenwirkens möglichst vieler im Klimasystem stattfindender physikalischer und chemischer Prozesse, deren Wirkung den Klimazustand bestimmt und die deshalb in numerischen Klimamodellen beschrieben werden müssen.

Bei diesem prozessorientierten Ansatz wird berücksichtigt, dass die sehr aufwendigen Messungen aus technischen, logistischen und finanziellen Gründen weltweit nur an wenigen Orten durchgeführt werden können und damit die Erfassung der relevanten räumlichen Skalen grundsätzlich unzureichend bleibt. Dagegen ermöglicht ein prozessorientierter Ansatz die Übertragbarkeit der Ergebnisse zum Beispiel durch den Einsatz von Klimamodellen. Dazu muss allerdings als zusätzliche Anforderung an die Beobachtungen sichergestellt werden, dass möglichst alle den jeweiligen physikalischen oder chemischen Prozess bestimmenden Größen gleichzeitig am selben Ort auch gemessen werden. Deshalb werden beispielsweise für eine Station im BSRN zusätzlich zu den aufwendigen Strahlungsmessungen Vertikalsondierungen von Temperatur und Wasserdampf sowie zusätzliche Bestimmung von Wolkenparametern gefordert (s. Kap. 3 bis 6). Daraus folgt zwangsläufig die Anforderung an die Observatorien, gleichzeitig sehr viele Größen zu beobachten, um die prozessorientierte Klimaüberwachung unterstützen zu können (s. Kap. 1 und 8).

3 Unterstützung zum Betrieb und zur Weiterentwicklung von Beobachtungssystemen

Der Betrieb der für die Erfüllung ihrer Aufgaben notwendigen Beobachtungssysteme erfordert eine aufwendige Infrastruktur und spezielles Wissen in den Observatorien. Beides ist geeignet, den Betrieb und die Weiterentwicklung der Messnetze im DWD und im Bereich der WMO zu unterstützen. Eine wichtige und notwendige Funktion für den Betrieb eines Messnetzes ist die Bereithaltung geeigneter Eich- und Kalibrierstandards, um alle in einem Messnetz eingesetzten Messgeräte gegen einen Standard vergleichen zu können. So werden durch das Observatorium Lindenberg für die **R**egional**a**ssoziation (RA) VI der WMO die Standardgeräte für Strahlungsmessungen zur Verfügung gestellt, die ebenfalls regelmäßig gegen den Weltstandard verglichen werden (s. Kap. 8). Die Kalibrierung der Messgeräte muss sowohl im Freien als auch im Labor durchgeführt werden, wozu aufwendige Laboreinrichtungen vorgehalten werden müssen (s. Kap. 1 und 3). Diese müssen stetig weiter entwickelt werden, um den ständig wachsenden fachlich begründeten Anforderungen der WMO folgen zu können. Das Observatorium Hohenpeißenberg stellt den regionalen Standard für das Dobson-Photometernetz im GAW-Programm für die RA VI der WMO bereit. Diese hochgenauen von Dobson vor 50 Jahren entwickelten, relativ einfach zu bedienenden Geräte werden seit vielen Jahren zur weltweiten Überwachung des Säulengehaltes von Ozon eingesetzt. Neben der Pflege und Bereitstellung des europäischen Standardgerätes, das regelmäßig gegen den Weltstandard verglichen wird, betreiben die Observatorien Hohenpeißenberg und Lindenberg jeweils ein solches Gerät als Beitrag zum internationalen Messnetz neben weiteren Geräten. Diese Dienstleistungen erbringen die Observatorien für die Mitglieder der WMO, für die Messnetze des DWD und für Forschungsinstitute und andere Betreiber von meteorologischen Messungen.

Auch wenn die Observatorien heute grundsätzlich keine Entwicklung neuer Messgeräte durchführen, erproben sie im Rahmen ihrer Aufgaben neue Messsysteme, die bisher nicht in den operationellen Messnetzen eingesetzt werden. Dabei suchen häufig die Entwickler den Kontakt zu den Observatorien, um die dort gewonnene Erfahrung in die Weiterentwicklung der Systeme einbringen zu können. Dadurch übernehmen die Observatorien zunehmend die Erprobung neuer Messsysteme für den operationellen Einsatz und führen die dazu notwendigen Entwicklungen von Schnittstellen, Software und zum Teil auch die Anpassung von Komponenten durch. Beispiele derartiger Entwicklungen sind der Radar-Verbund und die Einführung von Windprofiler/RASS-Systemen in das aerologische Messnetz des DWD (s. Kap. 5) und die zeitweise Koordinierung des Aufbaus eines europäischen Windprofilermessnetzes (s. Kap. 8). Damit leisten die Observatorien über ihre Aufgaben im Bereich der Klimaüberwachung hinaus wichtige Querschnittaufgaben und Dienstleistungen für den DWD und für die europäischen Wetterdienste.

4 Weiterentwicklung der Wettervorhersage

Der prozessorientierte Ansatz der Klimaüberwachung in den Observatorien hat unter anderem das Ziel, Daten zur Überprüfung der Beschreibung atmosphärischer Prozesse in atmosphärischen Simulationsmodellen bereit zu stellen, die sowohl für die Klimaanalyse und -vorhersage als auch für die Wettervorhersage eingesetzt werden. Von dieser Nutzung wurde bisher nur unzureichend Gebrauch gemacht. Hier könnte zukünftig eine engere Zusammenarbeit der bestehenden europäischen Observatorien hilfreich sein, die durch ihre räumliche Verteilung nahezu alle in Europa auftretenden Klimazonen abdecken können. Auch besteht sicher noch ein Entwicklungsbedarf an geeigneten Werkzeugen, um die Validierung von Parametrisierungen durch Einbeziehung von Beobachtungen zu verbessern (s. z. B. Kap. 6).

Da sich kein Zustand der Atmosphäre wiederholt, können Beobachtungen in der Atmosphäre nie reproduziert werden, da die Randbedingungen nicht kontrolliert werden können. Dieses grundsätzliche Pro-

blem der Atmosphärenforschung kann nur durch auf Dauer angelegte Messprogramme beantwortet werden, mit denen ein großes Spektrum der Variabilität der Atmosphäre erfasst wird. Diesen Vorteil besitzen die an den Observatorien gewonnenen Datensätze gegenüber Feldexperimenten über kurze Episoden. Dieser Vorteil kann bei der Weiterentwicklung atmosphärischer Simulationsmodelle für die Wettervorhersage allerdings nur genutzt werden, wenn die Validierung ebenfalls auf die gewonnenen langen Zeitreihen aufbaut, was für die Entwicklung geeigneter Validierungsverfahren eine zusätzliche Herausforderung darstellt. Ein ähnliches Problem stellt sich bei der Entwicklung von Auswerteverfahren für Satellitenbeobachtungen, die analog zu Vorhersageverfahren validiert werden müssen. Auch hier bieten sich die Datensätze der Observatorien aus den genannten Gründen an, allerdings ebenfalls mit dem entsprechenden Entwicklungsbedarf.

In Europa, insbesondere angetrieben durch das EZMW, findet zurzeit eine Diskussion über die Weiterentwicklung der Wettervorhersage zur Erdsystemvorhersage statt. Die Finanzierung eines entsprechenden internationalen Forschungsprojektes zur Entwicklung einer operationellen Überwachung des Erdsystems durch Nutzung von Verfahren aus der numerischen Wettervorhersage unter Führung des EZMW wurde inzwischen von der Europäischen Kommission bewilligt. Zur Validierung dieser geplanten Erdsystemüberwachung werden Verfahren und globale Datensätze zur Validierung benötigt, wie sie im GAW-Programm der WMO gewonnen und für das europäische Forschungsprojekt durch das Observatorium Hohenpeißenberg bereitgestellt werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Observatorien im Deutschen Wetterdienst leisten wichtige Beiträge zu den internationalen Programmen zur globalen Klimaüberwachung der WMO. Gleichzeitig stellen sie einen wichtigen Teil der Infrastruktur für die Atmosphärenforschung bereit, die von vielen Forschungsinstituten regelmäßig im gegenseitigen Interesse genutzt wird. Die Bedeutung der Observatorien in der Klimaüberwachung nimmt durch den Fortschritt der Atmosphärenforschung zu. Diese wird in wenigen Jahren zu einer Erweiterung der Aufgabenstellung der Wettervorhersage zur Erdsystemvorhersage und zu einer stark auf Satelliten gestützten Überwachung des Erdsystems und des Klimas führen. Die notwendige Validierung der zu erwartenden Produkte wird sich auf gut ausgebaute Stationen stützen, die am besten durch die Observatorien der nationalen Dienste bereit gestellt werden können (s. Kap. 1 und 8). Entsprechende Programme zur Entwicklung solcher auf Fernerkundungssystemen und Referenzstationen aufbauenden Beobachtungssystemen gibt es schon heute, wie die **C**oordinated **E**nhanced **O**bserving **P**eriod CEOP (s. Kap. 6 und 8), einem Element des Weltklimaforschungsprogrammes. Dazu ist die Zusammenarbeit der europäischen meteorologischen Observatorien (Cabauw in den Niederlanden, Lindenberg in Deutschland, Sodankylä in Finnland) gestärkt worden.

promet, Jahrg. 31, Nr. 2–4, 119-128 (Oktober 2005)
© Deutscher Wetterdienst 2005

M. WELLER

3 Untersuchung von Strahlungsflüssen am Meteorologischen Observatorium Lindenberg

Investigation of Radiant Fluxes at the Meteorological Observatory Lindenberg

Zusammenfassung
Das Kapitel lässt Arbeiten Revue passieren, die auf dem Gebiet der Strahlungsflussmessungen am Meteorologischen Observatorium Lindenberg im Laufe der Zeit durchgeführt wurden. Beginnend mit Ergebnissen aus den ersten 50 Jahren, werden gegenwärtige Forschungsprojekte und deren Ergebnisse beschrieben, die am MOL, der Regionalen Strahlungszentrale der WMO für Europa, durchgeführt werden. Breitband- und spektrale Messungen werden getrennt betrachtet, und, ohne den Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben, insbesondere Arbeiten erwähnt, die sich mit dem Einfluss der Strahlung auf das Klima (BSRN- und Trübungsmessungen) und das menschliche Wohlbefinden (UV-B-Messungen) beschäftigen, aber auch der Fernerkundung sowie der Validierung von Satellitendaten im sichtbaren und nahen infraroten Spektralbereich dienen.

Abstract
The chapter passes in revue the work of the Observatory Lindenberg done in the field of radiative flux measurements in the course of time. Starting with results achieved during the first 50 years of Lindenbergs history recent projects of radiative research and results followed from this are described. Broad band measurements and spectral resolved measurements are considered separately. Especially research activities focused on the influence of the radiation on climate (BSRN- and turbidity measurements e. g.), human welfare (UV-B measurements e. g.), remote sensing and satellite data validation in the visible and near infrared spectral region have been reported not laying claim to be completely. The new function of the Meteorological Observatory as Regional Radiation Center of the WMO is mentioned.

1. Arbeiten am vormals Aeronautischen/Aerologischen Observatorium Lindenberg

Zwei Arbeiten können als der Beginn der Strahlungsforschung in Lindenberg gelten, der während des 1. Weltkriegs von Robitzsch entwickelte Bimetall-Aktinograph, dessen Weiterentwicklung in verschiedenen Messnetzen zum Einsatz kam (DUBOIS 1993) und Hergesells 1919 veröffentlichter, wichtiger Beitrag zum Problem des Strahlungsgleichgewichts „Die Strahlung der Atmosphäre unter Zugrundelegung von Lindenberger Temperatur- und Feuchtigkeitsmessungen“ (HERGESELL 1919). Einen Meilenstein in der Geschichte der Strahlungsmessung in Lindenberg stellen auch die mehrjährigen Messungen dar (1926/27 über 600 Einzelmessungen (DUBOIS 1993)), die von P. Duckert mit einem von Dobson zur Verfügung gestellten UV-Spektrographen zur Bestimmung des Ozongehalts der Gesamtatmosphäre durchgeführt wurden. Während seiner kurzen Lindenberger Zeit von Juli 1934 bis Ende 1935 schloss Marten hier die Potsdamer aktinometrischen Messungen der Strahlung der Sonnenumgebung ab (MARTEN 1933) und Robitzsch konstruierte zwischen 1932 und 1934 verschiedene Geräte zur Messungen von Himmelshelligkeiten, Arbeiten, die in der jüngeren Vergangenheit am MOL in modifizierter Form wiederbelebt wurden, um strahlungswirksame Aerosolparameter aus Himmelsstrahldichten bestimmen zu können.

Am 01.04.1936 nahm Foitzik seine Tätigkeit am damaligen Aeronautischen Observatorium auf, das seit dem 01.01.1936 von Koschmieder geleitet wurde. Damit begannen umfangreiche theoretische und experimentelle Arbeiten zur Sichtforschung, die DUBOIS (1993) chronologisch dargestellt hat und die sich an die Bestimmung der bereits von KOSCHMIEDER (1925) eingeführten, idealisierten Sichtweite, später in repräsentative Sichtweite umbenannt, anschlossen. Foitzik richtete dazu am Observatorium eigens eine Station für systematische Sichtuntersuchungen ein. Zwischen 1942 und dem Kriegsende spielte die angewandte Sichtforschung von Dubois, insbesondere die Untersuchung des Zusammenhangs von Beleuchtung, Albedo, Gezeiten- und Wetterlage, für die Kriegsführung, speziell in Erwartung der Landung der Alliierten an der belgischen oder französischen Küste, eine Rolle. Noch zu Kriegsende, so berichtet DUBOIS 1993, liefen am AOL Untersuchungen zum Einfluss von Wolkendecken auf die Sicht und die Transmission von Leuchtbombenlicht. Koschmieder und Foitzik bearbeiteten das Reichweitenproblem von Scheinwerfern von Potsdam aus (FOITZIK 1952) in enger Zusammenarbeit mit der erwähnten Sichtstation des AOL, wobei die Frage nach der vertikalen Trübungsschichtung der Atmosphäre und deren Bestimmung (DUBOIS 1993, S.189) auftauchte. Es war bereits für den täglichen Dienst geplant, an 10 bis 20 Wetterwarten zu festen Terminen die Trübungsschichtung der Atmosphäre bis in 7 km Höhe durch die Photometrierung senkrechter Scheinwerferstrahlen zu ermitteln.

„Eine verstärkte Wiederaufnahme und Fortführung der vor und während des Krieges ausgeführten Arbei-

ten auf dem Gebiet der Sicht- und Trübungsforschung setzte mit der im Zuge des Wiederaufbaus am Observatorium Lindenberg 1946 eingerichteten Abteilung für Sichtforschung ein" (DUBOIS 1993). Den mit der Eingliederung der Mitarbeiter des ehemaligen Potsdamer Meteorologischen Observatoriums in Lindenberg nun wiederbelebten Aktivitäten zur Bestimmung von Vertikalprofilen der Sichtweite innerhalb der Mischungsschicht gehen die zahlreichen Arbeiten von Foitzik bzw. Foitzik und Krestan aus dieser Zeit voraus, für die stellvertretend die „Theorie der Schrägsicht" (FOITZIK 1946) und der Bau eines registrierenden Sichtmessers genannt seien. Bis zu seinem Weggang an das Institut für Optik der Deutschen Akademie der Wissenschaften in Berlin 1951 hat Foitzik, zuletzt in Gemeinschaftsarbeit und sich ergänzend mit Mücket, auf der Grundlage größerer experimenteller und theoretischer Untersuchungen den Grundstock zu zahlreichen Arbeiten gelegt, die zu mehreren gerätetechnischen Entwicklungen (Sichtschreiber, Vertikalsichtmesser) und Publikationen (über Kontrastschwellen, Streufunktionen bodennaher Luftschichten, Polarisationsgrade, bzw. die Optik von Dunst und Nebel) führten, die hier nicht alle genannt werden können, bei DUBOIS 1993, S. 209 ff. aber dokumentiert sind und bei denen die von FOITZIK gemeinsam mit HINZPETER geschriebene und 1958 veröffentlichten Monographie „Sonnenstrahlung und Lufttrübung" eine Art krönenden Abschluss darstellt.

Nach dem Weggang von Foitzik und später auch von Mücket wurden am Standort des Observatoriums in Verantwortung des Hauptamtes für Klimatologie des Meteorologischen Dienstes der DDR lediglich Pyranometermessungen durchgeführt. Die Strahlungsmessung bekam Mitte der 70er Jahre neuen Antrieb mit der Einbeziehung des Aerologischen Observatoriums in die INTERKOSMOS-Kooperation, speziell in deren Ständige Arbeitsgruppen für Fernerkundung und Kosmische Meteorologie sowie in die bilaterale Zusammenarbeit zwischen der Sowjetunion und der DDR in einem „**O**perativen **S**ystem **F**ernerkundung" (OSFE), das im Wesentlichen von Instituten der beiden Akademien der Wissenschaften getragen wurde.

Im Rahmen dieser Kooperation standen ab 1976 eine Reihe von Forschungsarbeiten im Vordergrund: Begonnen wurde mit der Entwicklung eines zur Messung von Reflexionsgraden, Strahldichten und optischen Dicken geeigneteen Spektrometers. Das Gerät wurde unter Einbeziehung des Instituts für Kosmosforschung der AdW der DDR entwickelt, patentiert und unter der Bezeichnung BAS in verschiedenen Varianten in Kleinserie gebaut. Die BAS-Geräte verfügten über 6 Spektralkanäle, die identisch waren mit denen der Multispektralkamera MKF-6 des Kombinats Carl Zeiss-Jena, und über weitere 35 zusätzliche, durch Verlaufinterferenzfilter realisierte Spektralkanäle zwischen 0,4 und 1,2 µm. Für die Entwicklung und den Bau des BAS waren hauptsächlich U. Leiterer, K-H. Schulz, R. Stolte und M.Weller verantwortlich. Bei den BAS (LEITERER und WELLER 1988) wird wechselweise die Globalstrahlung und die Strahlung punktförmiger wie ausgedehnter Strahler mit Wechselobjektiven verschiedener Öffnungswinkel (0,3° für Almucantarmessungen, 1,1° für Messungen der direkten Solarstrahlung und 16° für Messungen der reflektierten Strahlung verschiedener Oberflächen) binnen 10 s in einem Dynamikbereich von $5x10^8$ bis 10^9 gemessen. Die mit diesen Geräten bestimmten spektralen, gerichteten Strahldichten, Reflexionsgrade und Albedowerte verschiedener natürlicher und künstlicher Oberflächentypen sowie die spektralen Transmissionen (optischen Dicken) und Streufunktionen der Atmosphäre dienten als Eingangsgrößen für die Modellierung des Atmosphäreneinflusses auf die vom Flugzeug oder der Raumstation aus gemessenen Strahldichten irdischer Objekte.

Folgerichtig stellte sich parallel dazu die Aufgabe der radiometrischen Kalibrierung der Multispektralkamera MKF-6, die zusammen mit den BAS bei verschiedenen Weltraumexperimenten (u. a. auch der von S. Jähn an Bord von Salut 6 im Jahre 1978) und bei dazu parallelen wie auch separaten Flugzeugexperimenten eingesetzt wurde. Diese Arbeiten waren verbunden mit der Schaffung von Kalibrierreferenzen (Fachausdruck: Etalons) für spektrale Bestrahlungsstärke- und Strahldichtekalibrierungen, die an die allgemein zugängliche und von der WMO empfohlene radiometrische Skala der Sonne (NECKEL und LABS 1984) angeschlossen wurden. Der bewusst gewählte hohe Dynamikumfang der Geräte erlaubte den Transfer der „Kalibrierung vor Sonne" ins Labor und damit den radiometrischen Anschluss photochemisch erzeugter Graukeilstufen der MKF-6 an die extraterrestrische Solarstrahlung. Aufnahmen mit dieser Kamera konnten ab 1978 in Gemeinschaftsarbeit mit dem **Z**entralinstitut für **P**hysik der **E**rde (ZIPE, heute Geo-Forschungszentrum) digitalisiert, bezüglich des Einflusses der Atmosphäre des Objektivs und der Fenster (Illuminatoren) der SOJUS- bzw. MIR-Stationen korrigiert und nach dieser Bearbeitung bei Bedarf erneut visualisiert werden. Schließlich wurden mit Hilfe der BAS-Messungen variable optische Parametern der atmosphärischen Aerosole und Reflexionsgraden der Erdoberfläche bestimmt, um über Strahlungstransportrechnungen den Einflusses der Atmosphäre auf Satellitendaten im VIS/NIR berücksichtigen zu können. Da der Raum um das Observatorium, einschließlich des Scharmützelsees ein sog. INTERKOSMOS-Testpolygon darstellte, kam hier das BAS häufig zum Einsatz. Die Variante BAS-W zur Bestimmung der inneren spektralen Reflexionsgrade von Wasserkörpern unterschiedlicher Chlorophyll- und Gelbstoffkonzentration, wurde auf hoher See eingesetzt. Der Einsatz der BAS-Spektrometer auf den Welt- und Binnenmeeren, den Polargebieten und verschiedenen Festlandsgebieten, ergab einen ersten Überblick über regionale Unterschiede aerosolbedingter Trübungen der Atmosphäre

(WELLER und LEITERER 1988). Viele Resultate wurden in internen INTERKOSMOS-Forschungsberichten dokumentiert. Ein Beispiel, das für die geschlossene Linie von Geräteentwicklung, Gerätebau, Messung und Modellierung am ehemaligen AOL steht, zeigt in Abb. 3-1 der Vergleich zwischen den mit Hilfe von BAS-Messungen modellierten und den mit einem radiometrisch vergleichbaren Mehrkanal-Spektrometer an Bord der MIR-Station über Tiefsee- und Flachwassergebieten südlich (Flachwasser) und nördlich (Tiefsee) der Kubanischen Hauptinsel gemessenen spektralen Strahldichten. Aufgrund der internationalen Verträge bestand bei den INTERKOSMOS-Projekten, die an Pflichtenhefte, Anfangs-, Zwischen- und Abschlussverteidigungen gebunden waren, ein erheblicher Kontroll- und Realisierungsdruck.

Als Vertreter in den sog. „Ständigen Arbeitsgruppen für Kosmische Fernerkundung“ und Kosmische Meteorologie“ sowie im „Operativen System Fernerkundung“, einem bilateralen Projekt zwischen der DDR und der Sowjetunion, waren Leiterer und Weller für die interne Projektarbeit mit den Instituten für Kosmosforschung und Meereskunde der ADW der DDR, der Universität Leipzig und dem Kombinat „Carl Zeiss Jena“ zuständig und an den dazu im Rahmen von INTERKOSMOS durchgeführten internationalen Experimenten beteiligt. 1986 wurde der Entschluss gefasst, die im Rahmen der INTERKOSMOS-Experimente durchgeführten Messungen der spektralen atmosphärischen Transmission (Trübung) routinemäßig durchzuführen und in das quasi-operationelle Observatoriums-Monitoring aufzunehmen. So wurde im Februar 1986 die unseres Wissens nach den Messungen am Mauna Loa Observatorium längste Zeitreihe der spektralen Trübung gestartet (s. Abb. 3-7).

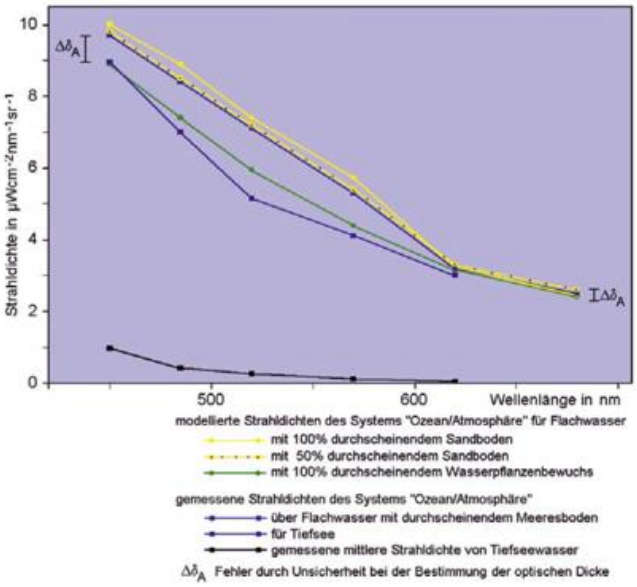


Abb. 3-1: Vergleich zwischen den mit Hilfe von BAS-Messungen modellierten und den mit dem radiometrisch vergleichbaren Mehrkanal-Spektrometer MKS der MIR-Station über Tiefsee- und Flachwassergebieten der Karibik gemessenen spektralen Strahldichten.

2 Arbeiten am Meteorologischen Observatorium Lindenberg

2.1 Überblick

Nach der Eingliederung des AOL als MOL in den DWD ermöglichte eine Reihe von drittmittelfinanzierten Projekten den Ausbau der spektrale Messmethodik: Für die Qualitätskontrolle von UV-B-Messgeräten, die an verschiedene Strahlungsnormale angeschlossen sind, wurde in einem BMBF-Projekt („Optische Feldmessmethoden“) ein Transfer-Radiometer auf Filterbasis entwickelt, mit dem eine spektrale Bestrahlungsstärke von 1,2 x 10^{-9} Wcm^{-2} nm^{-1} bei 305,5 nm noch nachweisbar ist und das an die radiometrischen Skalen von NIST, PTB und BESSY 1 (Synchrotron-Strahlung) angeschlossen wurde. Eine wesentliche Erweiterung erfuhr die Messung der spektralen optischen Dicke (Trübung) der Atmosphäre durch die Einbeziehung der Wasserdampfbanden im NIR. In deutsch-russischer Gemeinschaftsarbeit wurde vom MOL und dem Astronomischen Observatorium St. Petersburg – Pulkowo (Russische Akademie der Wissenschaften) Methodik und Instrumentarium entwickelt (LEITERER et al. 1998), um sowohl durch Messung der spektralen Solarstrahlung als auch der Strahlung (Sternmagnituden) von Sternpaaren Trübung und Gesamtwassergehalt der Atmosphäre bei gering bedecktem Himmel Tag und Nacht berechnen zu können.

Die vielseitige Einsatzmöglichkeit dieser Geräte, aber auch die dazu peripheren Messsysteme des MOL und seines Grenzschichtmessfeldes wurden bei mehrjährigen Forschungsprojekten wie SANA, BayFORKLIM und besonders bei dem mit internationaler Beteiligung am MOL durchgeführten LACE-Projekt (**L**indenberger-**A**erosol-**C**harakterisierungs-**E**xperiment) genutzt. Hierbei stand die Bestimmung umwelt- und klimarelevanter optischer Aerosolparameter im Vordergrund. Aber auch die Spektralcharakteristik der von Wolken verschiedenen Typs geprägten Globalstrahlung (normiert auf die spektrale Bestrahlungsstärke bei 630 nm ist beispielsweise geschlossene Stratusbewölkung relativ „blauer“ als der wolkenlose Himmel) konnte international präsentiert werden.

1997 wurden die routinemäßigen spektralen Kalibrierungen „vor Sonne“ nach den Erfahrungen mit vorausgegangenen Kampagnen in der Mongolei, Aserbaidshan, Bulgarien und später auf der Zugspitze an das Astrophysikalischen Institut der Kanaren in Izaña/ Teneriffa und an die dortige GAW- Station verlegt. Damit wurde eine Zusammenarbeit wiederbelebt, die 90 Jahre zuvor durch Hergesell mit der Einrichtung des Teneriffa Observatoriums, an dem „vor allem Pilotballonvisierungen vorgenommen wurden“ (DUBOIS 1993), ihren Ursprung hatte.

Nach der deutschen Wiedervereinigung erfolgte die Schließung des Meteorologischen Observatoriums

Hamburg; Teile seiner Strahlungsabteilung unter K. Dehne wurden 1994 nach Potsdam an das dortige Meteorologische Observatorium verlegt. Bereits 1994 wurde die BSRN-Station, deren Standort zwingend über eine Radiosonden-Aufstiegsstelle verfügen muss, in Lindenberg durch das MOL in Betrieb genommen und im Rahmen der langjährigen Kooperation zwischen beiden Observatorien wissenschaftlich durch das MOP betreut.

Mit der dann ebenfalls vorgenommenen Schließung des Meteorologischen Observatoriums Potsdams im Jahre 2002 (letzter Leiter K. Dehne) wurden die mit der Strahlungsmessung und der Betreuung des Strahlungsmessnetzes des DWD verbundenen Mitarbeiter, die Labors und die Geräte in das MOL integriert. Zu diesem Zweck war auf dem Kalkberg des MOL eine neue Strahlungszentrale mit einer 275 m^2 großen Messplattform errichtet worden, die im Mai 2003 in Betrieb ging (s. Abb. 1-46 bis 1-48). Sie bietet moderne Bedingungen, um hier die Funktion der Nationalen und Regionalen Strahlungszentrale RA VI der WMO bestens ausfüllen zu können. Die Strahlungszentrale verfügt über verschiedene, teilweise schwarz ausgekleidete und klimatisierte Labors mit verschiedenen Kalibrier- und Datenerfassungsanlagen, die sich unterhalb der etwa 30 unterschiedliche Strahlungsmessgeräte tragenden Messplattform befindet. Die wesentlichen, im Folgenden beschriebenen Messgeräte dienen vier Kernaufgaben:

- die Qualität des Strahlungsmessnetzes des DWD zu garantieren,
- Satellitendaten zu validieren und damit die Modellkette des DWD zu unterstützen,
- durch homogene lange Messreihen umwelt- und klimarelevanter Strahlungsparameter Daseinsvorsorge (UV-Index) zu betreiben und schließlich
- im Rahmen der WMO der internationalen Verantwortung als Regionale Strahlungszentrale RA VI und gleichzeitige BSRN-Station gerecht zu werden.

2.2 Breitbandige Strahlungsmessungen

Bis in die 50er Jahre des vergangenen Jahrhunderts wurde die Strahlungsforschung intensiv nur von einigen Instituten und Observatorien betrieben. In Deutschland hatte das Meteorologische Observatorium Potsdam (MOP) dabei u. a. durch Süring und Feußner eine führende Rolle inne, was sich u. a. darin dokumentiert, dass seit 1937 in Potsdam kontinuierlich Global- und diffuse Sonnenstrahlung registriert werden. Bedingt durch die Teilung Deutschlands nach dem 2. Weltkrieg entstand in der BRD in Hamburg ein Strahlungsobservatorium unter Leitung von R. Schulze. Mit der Vorbereitung und Durchführung des **I**nternationalen **G**eophysikalischen **J**ahres (IGJ) 1958/59 wurden weltweit die Strahlungsmessungen u. a. durch eine umfangreiche Erweiterung der Strahlungsmessstationen zu einem Strahlungsmessnetz zusammengefasst und intensiviert. In Deutschland wurde das Strahlungsmessnetz von vier (West: 2/Ost: 2) um fünf (West: 3/Ost: 2) auf neun Stationen erweitert. An den zum Zwecke der weltweiten Vergleichbarkeit aus Anlaß des IGJ seit 1958 am **P**hysikalisch-**M**eteorologischen **O**bservatorium **D**avos (PMOD) regelmäßig durchgeführten Internationalen Pyrheliometervergleichen nahmen Wissenschaftler aus dem MD und DWD mit ihren Referenzinstrumenten teil. Auf Grund der Bedeutung der Strahlung und der Notwendigkeit in der Meteorologie andere Wege zu gehen als in der Standardmetrologie, wurde 1971 von der WMO ein Weltstrahlungszentrum am PMOD etabliert. Gleichzeitig wurden von den Regionalverbänden der WMO Regionale Strahlungszentren und von jedem Mitgliedsland Nationale Strahlungszentren geschaffen. Diese Strahlungszentren haben die Aufgabe, die weltweite Vergleichbarkeit der Strahlungsmessungen zu sichern. Die technischen Voraussetzungen und Aufgaben dieser Zentren sind im *„Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation"* (WMO 1996) festgelegt. Bis zur Vereinigung der beiden deutschen Staaten im Jahre 1990 waren die Observatorien in Hamburg und Potsdam die jeweiligen Nationalzentren. Das MO Hamburg hatte zudem seit 1986 auch die Funktion eines Regionalen Strahlungszentrums inne. Diese Aufgabe wechselte dann mit der Auflösung des MO Hamburg über das MO Potsdam im Jahre 2003 nunmehr zum MO Lindenberg.

In Lindenberg sind durch die neue Strahlungsmesszentrale, deren technische Ausrüstung, die mitgebrachten Referenzinstrumente (2 PMO6 und ein HF) und durch das Know-how der aus Potsdam umgesetzten Mitarbeiter beste Voraussetzungen zur Erfüllung der Funktion eines Nationalen und Regionalen (RA VI) Strahlungszentrums vorhanden. Die Verlegung des Strahlungszentrums von Potsdam nach Lindenberg wurde auch dazu genutzt, die Kalibrierung der kurzwelligen Strahlungsinstrumente sowohl vor Sonne als auch im Labor zu verbessern und, soweit möglich, eine Teilautomatisierung vorzunehmen. Während bei der Kalibrierung vor Sonne das alle zwei Minuten notwendige manuelle Stellen der Schattenscheiben zur Bestrahlung bzw. Beschattung mittels eines rechnergesteuerten Solartrackers erfolgt, läuft im Labor, bis auf die exakte manuelle Justierung, der Kalibrierprozess automatisch ab.

Seit Sommer 2004 verfügt das MOL auch über einen Satz langwelliger Referenzinstrumente bestehend aus 2 PIR und 2 CG4, die am World Infrared Radiometer Calibration Centre im Physikalisch-Meteorologischen Observatorium Davos an das langwellige Standardradiometer, das **A**bsolute **S**kyscanning **R**adiometer (ASR), angeschlossen wurden. Dadurch ist es möglich, auch im langwelligen Spektralbereich messende Geräte im Freien an einen Standard anzuschließen. Ein erfolgreiches Monitoring der kurz- und langwelligen Strahlungsströme lässt sich nur mit regelmäßig kali-

brierten und gewarteten Instrumenten durchführen. Es ist deshalb unumgänglich, in festen Zeitabständen die eingesetzten Messgeräte zu kalibrieren und nationale und internationale Vergleiche der Strahlungsstandards durchzuführen, um weltweit die zeitliche und räumliche Vergleichbarkeit der Messungen zu sichern. Kontinuierliche Registrierungen mit Pyranometern begannen in Lindenberg erst im Jahre 1981. Damals wurden an der *Automatischen FernMeldenden Station* (AFMS) je ein Pyranometer nach Sonntag zur Messung der Global- und diffusen Sonnenstrahlung angeschlossen. Die Daten wurden auf elektronischem Wege nach Potsdam übertragen, geprüft und im Einheitlichen Meteorologischen Datenspeicher (EMDS) in Form von Stundensummen in Wahrer Ortszeit (WOZ) abgelegt. Sie sind heute Bestandteil des Strahlungsdatenarchivs, das Daten von über 60 DWD-Stationen beinhaltet.

Beginnend mit dem 1. Oktober nahm 1994 die BSRN-Station Lindenberg ihre Messungen auf. Beim Basline Surface Radiation Network handelt es sich um ein im Rahmen des WCRP Ende der 80er Jahre des vergangenen Jahrhunderts geschaffenes weltweites Strahlungsmessnetz, das hochgenaue breitbandige Strahlungsmessungen zum Zwecke der Klimaüberwachung sowie zur Validierung von Satellitendaten und Klimamodellen liefern soll (OHMURA et al. 1998). Die Daten der direkten und diffusen Sonnenstrahlung, der Globalstrahlung sowie der Wärmestrahlung der Atmosphäre werden mit einer Frequenz von 1 Hz erfasst und zu Minutenmitteln verdichtet. Aus den 60 Sekunden-Werten einer Minute werden noch Minimum und Maximum sowie die Standardabweichung berechnet. Diese Strahlungswerte werden zusammen mit den entsprechenden Werten von Luftdruck, -temperatur und -feuchte an das Weltdatenzentrum an der ETH in Zürich übermittelt.

Die Mitwirkung am BSRN beschränkt sich aber nicht nur auf die Datenerfassung und -übermittlung, sondern schließt auch messmethodische Untersuchungen ein. In diesem Rahmen konnte u. a. gezeigt werden, dass eine Belüftung der Pyranometerkalotten die kurzwelligen Strahlungsmessungen verbessert und dass das CM22, das auch an der BSRN-Station Lindenberg seit Juni 2003 routinemäßig genutzt wird, die besten Messungen liefert (BEHRENS und DEHNE 2000).

Der Vergleich der Messergebnisse der atmosphärischen Wärmestrahlung mit entsprechenden Modellwerten bei wolkenlosem Himmel, die mittels LOWTRAN 7 aus Radiosondenprofilen berechnet wurden, ergab, dass ab November 1996 eine gute Übereinstimmung von Messung und Modell gegeben ist. In der Zeit davor ist eine systematische Abweichung von 4 % zu beobachten (BEHRENS und GERICKE 2001/2002). Im Vergleichzeitraum 10/1994 bis 10/2001 waren sechs verschiedene Pyrgeometer (vier PIR und zwei CG4) in teils sich überlappenden Zeiträumen eingesetzt. Auf Grund des in den 90er Jahren erfolgten schnellen Fortschritts auf dem Gebiet der langwelligen Strahlungsmessung wurden verschiedene Kalibrierungen (Schwarzer Körper des MOP und des Physikalisch-Meteorologischen Observatoriums Davos) und unterschiedliche Berechnungsformeln für die Wärmestrahlung verwendet. Sie sind als Ursache für diese Abweichungen anzunehmen. Die guten Ergebnisse ab November 1996 sind auf die Nutzung von modifizierten PIR (drei dome-thermistore) und auf eine verbesserte Auswerteformel nach PHILIPONA et al. 1995 zurückzuführen. Als Beispiel sind in Abb. 3-2 die Quotienten aus gemessener und berechneter Wärmestrahlung für 0 UTC dargestellt. Für 6, 12 und 18 UTC wurden ähnliche Resultate erhalten.

Seit Jahren, insbesondere aber seit den von PHILIPONA et al. (1995) eingeführten Verbesserungen, gilt das abgeschattete PIR als Quasistandard für die Messung der Wärmestrahlung. An der BSRN-Station in Lindenberg durchgeführte Vergleiche zwischen dem PIR und dem neuen, seit dem Jahr 2000 verfügbaren CG4 zeigen, dass beide Geräte etwa gleichwertig sind (BEHRENS 2002).

Die Globalstrahlung gibt die an der Erdoberfläche verfügbare kurzwellige Strahlungsenergie an und ist somit auch eine wichtige Größe für das Strahlungsmonitoring. Die Abb. 3 -3 zeigt die Zeitreihen der Jah-

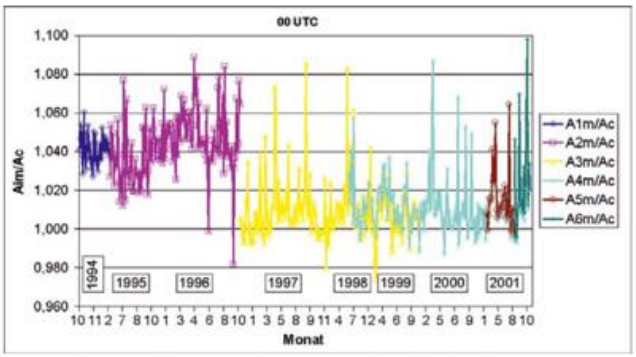


Abb. 3-2: Quotienten aus gemessener (Aim) und berechneter (Ac) Wärmestrahlung für 0 UTC.

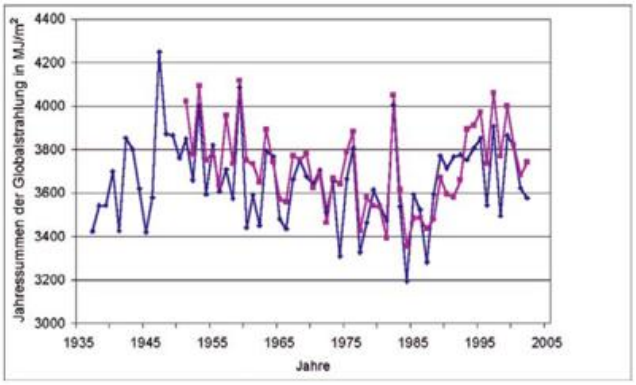


Abb. 3-3: Zeitreihen der Jahressummen der Globalstrahlung in Lindenberg (rot) und zum Vergleich im etwa 100 km entfernten Potsdam (schwarz).

ressummen in Lindenberg und im etwa 100 km entfernten Potsdam als Vergleichsreihe. Während die Potsdamer Reihe ausschließlich auf Messwerten beruht, wurden die Lindenberger Globalstrahlungsdaten vor 1981 auf der Grundlage einer Regression aus der Sonnenscheindauer berechnet. Die Korrelationskoeffizienten lagen zwischen 0,56 im August und 0,93 im April. Beide Globalstrahlungsdatensätze zeigen einerseits eine gute Übereinstimmung mit den witterungsbedingten Schwankungen, was auf Grund der geringen Distanz nicht verwundert, andererseits auch Unterschiede, wie sie Ende der 80er/Anfang 90er Jahre zu sehen sind. In den einzelnen Monaten tritt dieses Muster in ähnlicher Weise nur noch im August auf und ist in der Lindenberger Zeitreihe in erster Linie das Resultat der Kumulation der verschiedenen Monatswerte. Im Mittel 1951/2002 wurde in Lindenberg mit etwa 2 % nur geringfügig mehr an Globalstrahlungsenergie als in Potsdam empfangen, wobei aber mehr als zwei Drittel der Einzeljahressummen größer als die in Potsdam waren. Die von Mitte der 70er bis Ende der 80er Jahre an beiden Standorten beobachtete niedrige Globalstrahlung korrespondiert gut mit Werten anderer Stationen sowie mit den aus Satellitendaten abgeleiteten Befunden und wird allgemein als „Global Dimming" bezeichnet.

2.3 Spektrale Strahlungsmessungen im ultravioletten, sichtbaren und nahen infraroten Spektralbereich

Zu den bedeutsamen historischen Meilensteinen der Solarforschung, die den Weg für die spektrale Messung der Solarstrahlung und der Erforschung solar-terrestrischer Beziehungen wiesen, gehören die Entdeckung der spektralen Natur weißen Lichts durch Isaac Newton im Jahre 1672, die Entdeckung des ultravioletten Spektralbereichs durch Johann Wilhelm Ritter im Jahre 1801 und die erste Vermessung der im Jahre 1802 von William Hyde Wollaston entdeckten Absorptionslinien der Solarstrahlung durch Joseph von Fraunhofer im Zeitraum 1812–1814. S. P. Langley (1834–1906) entwickelte ein Bolometer, das er im Jahre 1883 in Kombination mit einem von H. A. Rowland (1848–1901) konstruierten Gittermonochromator zur Aufzeichnung der spektralen Solarstrahlung einsetzte.

Die neuen Erkenntnisse ermöglichten eine Vielzahl weiterer Entdeckungen und initiierten darüber hinaus die Entwicklung verbesserter optischer Spektrographen für die spektrale Solarstrahlungsmessung, insbesondere im UV. Der Einsatz solcher Messgeräte erfolgte bald auch in den atmosphärischen Wissenschaften (DOBSON und HARRISON 1925, s. auch KÖRBER 1993).

Im Bereich des Wetterdienstes in Deutschland wurde eine erste systematische Reihe von Ozon-Messungen mit einem Dobson-Spektrophotometer 75 km von Lindenberg entfernt am Meteorologischen Observatorium Potsdam von 1942 bis 1945 aufgenommen, 1957 bis 1959 zunächst mit einem Hoelper-Spektrometer weitergeführt und ab 1964 durch regelmäßige Messungen mit einem Dobson-Spektrophotometer zur Ableitung des atmosphärischen Säulenozongehalts ergänzt (Abb. 3-4). Im September 1992 begannen in Lindenberg mit dem Brewer-Spektrometer Nr. 78 Ozon-Gesamtgehaltsmessungen, zu denen seit Mai 2003 parallele Dobson-Ozonmessungen mit dem von Potsdam nach Lindenberg transferierten Messgerät erfolgten.

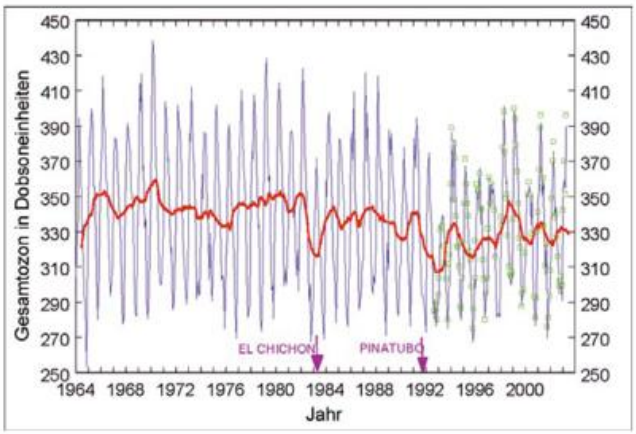


Abb. 3-4: Aus täglichen Messungen mit den Dobson-Spektrophotometern Nr. 64 und Nr. 71 bestimmte Monatsmittel des Ozongesamtgehalts in Potsdam (1964–2003), daraus berechnete 12-monatig gleitende Mittelwerte sowie aus Brewer- Messungen in Lindenberg (1992–2003) abgeleitete Monatsmittel des Ozongesamtgehalts.

Zu den bekanntesten, durch Strahlung ausgelösten Wirkungen gehören die durch sichtbare Strahlung (400–700 nm) bewirkte Photosynthese und die Erythembildung der Haut, die durch ultraviolette Strahlung hervorgerufen wird (FEISTER 1994). Langzeitige Änderungen der Strahlungsdosis als Folge einer Änderung der Konzentration spektral selektiv absorbierender Atmosphärenbestandteile lassen sich nur durch Spektralmessungen der Strahlung nachweisen, weil die Änderung der über die Wellenlänge integrierten Werte der Strahlung meist innerhalb der Messunsicherheit der integralen Strahlungsmessung liegt. Im Spektralbereich des Ultraviolett, der in Lindenberg durch regelmäßige Messungen erfasst wird, sind dies die Bereiche des UV-A (315–400 nm) und des UV-B (280–315 nm).

Spektralradiometrische Messungen im Bereich von 290 nm bis 325 nm begannen am Observatorium Lindenberg im Jahre 1995 mit dem Brewer-Spektralradiometer des Typs MKIV. Die Messreihe der in Lindenberg von 1995 bis 2003 erfassten spektralen Bestrahlungsstärken wurde im Rahmen der europäischen Forschungsprojekte SUVDAMA (**S**cientific **UV** **Da**ta **Ma**nagement) und des Nachfolgeprojekts EDUCE (**E**uropean **D**atabase for **U**V **C**limatology and **E**valuation) in den am Finnischen Meteorologischen Institut eingerichteten Datenspeicher eingespeist.

Nach der Auflösung des Potsdamer Observatoriums wurde die Gerätebasis des Lindenberger Observatoriums im Zuge der Eingliederung der Regionalen Strahlungszentrale im Mai 2003 durch zusätzliche Brewer-Spektralradiometer erweitert. Mit dem Brewer-Gerät Nr. 118 war das MOL erfolgreich an Spektralradiometervergleichen wie dem nationalen Spektralradiometervergleich in Garmisch-Partenkirchen im Jahre 1997 und der europäischen Vergleichskampagne QASUME (**Q**uality **A**ssurance of **S**pectral **U**ltraviolet **M**easurements in **E**urope) im Jahre 2004 beteiligt. Mit dem seit 2003 in Lindenberg eingesetzten Spektralradiometer Bentham DM150, dessen Spektren der solaren Bestrahlungsstärke von 290 bis 450 nm in Zeitabständen von 6 min unmittelbar in das ‚Solare UV Monitoring in Deutschland' (SUVMONET) einfließen, wurde der 2000 begonnene direkte UV-Strahlungsdatenaustausch zwischen dem DWD und dem Bundesamt für Strahlenschutz /Umweltbundesamt (BfS/UBA) fortgesetzt.

Bekanntlich üben Wolken auch im UV-Bereich einen sehr großen und zeitlich variablen Einfluss auf die den Erdboden erreichende Solarstrahlung aus. Sie können die UV-Globalstrahlung auf Werte unter 5 % der für wolkenlosen Himmel für dieselbe Sonnenhöhe zu erwartenden Werte schwächen, oder durch Mehrfachstreuung der Solarstrahlung um mehr als 20 % über den wolkenlosen Fall hinausgehend erhöhen. Eine in Potsdam gewonnene Messreihe der solaren erythemwirksamen UV-Strahlung zeigt, dass Bewölkungsvariationen im Mittel eine zusätzliche Unsicherheit der Stundensummen der erythemwirksamen Strahlung um 3 % bzw. 6 % (95- und 99-Quantile) erzeugen, wenn der Messwerterfassungsabstand von 1 min auf 6 min erhöht wird. Für einen Messzeitabstand von 30 min ergeben sich zusätzliche Unsicherheiten der Stundensummen der erythemwirksamen Bestrahlung von 15 % bzw. 28 % (FEISTER et al. 2003). Durch den Einsatz neuer Typen schnell messender Spektralradiometer, die Spektren der Solarstrahlung in etwa 5–30 s registrieren, sollen solche zusätzlichen Unsicherheiten und Verzerrungen der Spektren durch schnell ziehende Wolken vermeiden werden. Mit dem **UV-SP**ekt**RA**lradiometer auf **FI**lter-**MO**dell-Basis (UV-SPRAFIMO), das am Zentrum für Solar- und Wasserstoffforschung in Stuttgart unter Beteiligung des MOL und weiterer Einrichtungen entwickelt und getestet wurde, lassen sich UV-Solarstrahlungswerte in schmalen Wellenlängenintervallen (etwa 2 nm) und in Zeitabständen von bis zu 5 s erfassen und durch automatisierte Anwendung eines neuronalen Netzes zu spektral hochaufgelösten Spektren im Bereich von 280 nm bis 450 nm ergänzen. Ein Gerät dieses Typs wurde 2004 in Lindenberg in Probebetrieb genommen.

Die hohe spektrale und zeitliche Auflösung der mit UV-SPRAFIMO gewonnenen Solarstrahlungs-Spektren eröffnet die Möglichkeit, diese Geräte auch für die Kontrolle anderer Spektralradiometer einzusetzen. Ein weiterer, am MOL seit 2003 verfügbarer, schnell messender Spektralradiometertyp ist das Gerät SPECTRO 320D, das für einen spektralen Scan von 290 bis 450 nm mit einer spektralen Schrittweite von 0,2 nm etwa 30 s benötigt. Vergleiche beider Gerätetypen UV-SPRAFIMO und SPECTRO 320D zeigten gute Übereinstimmung, gaben jedoch auch Hinweise auf Möglichkeiten der konstruktiven Verbesserung der Geräte, die zum Teil bereits erfolgte (FEISTER et al. 2003). Derartige Vergleichsmessungen, die zu apparativen Verbesserungen führen, sind eine der Aufgaben einer Strahlungszentrale.

Grundlegende Bedeutung für die Vergleichbarkeit spektraler Bestrahlungsstärkemessungen haben die Kalibrierung, die Richtighaltung und die Charakterisierung der optischen Eigenschaften der Messgeräte. In Lindenberg werden in der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt geeichte Primärstrahler des Typs FEL 1000W sowie auf ihrer Grundlage mittels eines Transfer-Spektralradiometers am Observatorium kalibrierte Sekundärstrahler genutzt. Datenqualitätskontrollen wie die Gegenüberstellung der mit verschiedenen Spektralradiometern zeitgleich gemessenen Bestrahlungsstärkespektren, der Einsatz von Kalibrierteststrahlern (Kontinuumstrahler, Linienstrahler) sowie die Anwendung von Daten-Prüfprogrammen einschließlich von Strahlungstransport-Modellrechnungen und Testprogrammen der Wellenlängenjustierung der Spektralradiometer tragen zur Qualitätskontrolle der Messgeräte zwischen den Kalibrierungen bei. Die Charakterisierung ist vor allem in der Phase der Erprobung neuer Geräte wichtig, um die optischen Eigenschaften der Geräte und ihre Messunsicherheiten kennen zu lernen. Für die Charakterisierung und Testung der Spektralradiometer stehen klimatisierte Schwarzräume und spezielle Anlagen wie die durch PC gesteuerte Vorrichtung zur räumlichen Vermessung von Eingangsoptiken, UV-Laser, optische Bänke und eine Klimakammer zur Verfügung.

Die Erfassung verschiedener Komponenten der Strahlung in verschiedenen Spektralbereichen in der Kombination mit anderen, für den Strahlungstransport relevanten atmosphärischen Parametern an einem Standort liefert die erforderlichen Datenbasis, um Modelle zu testen und Parameterisierungen abzuleiten. Mit den kombinierten Datenreihen können unter anderem auch lange Reihen der solaren UV-Strahlung mittels statistischer Parameterisierung oder Anwendung von Strahlungstransportmodellen als Input rekonstruiert werden. (z. B. FEISTER et al. 2002) Die Abb. 3-5 illustriert die aus gemessenen Strahlungsparametern (Tagessummen der Globalstrahlung und der diffusen Strahlung, Tagesmittel des Ozongesamtgehalts) mit einem statistischen Modell rekonstruierten Reihen der erythemwirksamen UV-Strahlung für Potsdam (1937–2003) und Lindenberg (1981–2003). Das Verfahren gestattet es, den Einfluss des atmosphärischen Ozons und der Bewölkung auf den Teil der

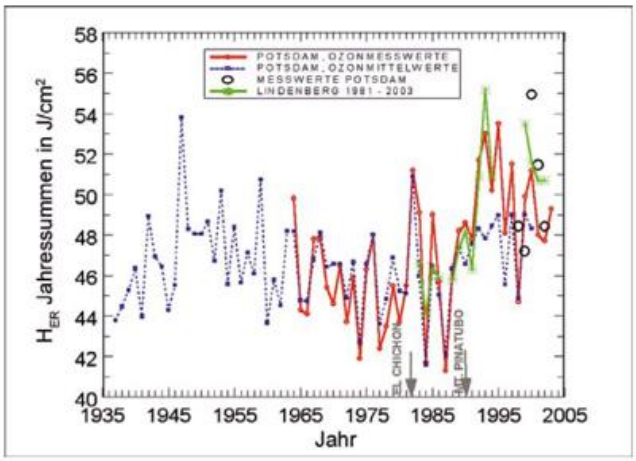


Abb. 3-5: Aus gemessenen Tagessummen der solaren Globalstrahlung und der diffusen Strahlung und aus täglichen Messungen des atmosphärischen Ozongesamtgehalts rekonstruierte Tages- und Jahressummen der erythemwirksamen (CIE87) Strahlung in Potsdam und Lindenberg.

durch Ozonabsorption beeinflussten UV-Strahlung zu separieren. Die Abb. 3-5 zeigt, dass meist der Einfluss interannualer Bewölkungsvariationen die Jahressummen der erythemwirksamen Strahlung dominiert, während Ozonanomalien, wie sie nach großen Vulkaneruptionen durch emittierte Schwefelsäurepartikel und damit verbundene stratosphärische Temperaturänderungen (El Chichon im Jahre 1982 und vor allem Mt. Pinatubo im Jahre 1991) diesen rekonstruierten Werten zufolge zu einer Erhöhung der Jahressummen der erythemwirksamen Strahlung (in Potsdam) um nur 2–4 % geführt haben dürften (FEISTER und GREWE 1994). Das 40fache der erythemwirksamen Strahlung in $(W/m^2)_{ER}$ ist der UV-Index, der durch Kurzfristvorhersagen der Öffentlichkeit zugänglich gemacht wird (STAIGER et al. 1997). Die UV-Strahlungsmessungen am MOL dienen nicht zuletzt auch zur Validierung solcher UV-Indexvorhersagen (KOEPKE et al. 2001).

Wolken üben von allen Atmosphärenbestandteilen den größten energetischen Einfluss auf die den Erdboden erreichende Solarstrahlung aus. Für die Dokumentation und Klassifizierung von Strahlungsmessungen wurden verschiedentlich Methoden zur Bewölkungsklassifizierung (‚Cloud flagging') mittels konventioneller Mess- und Beobachtungswerte der Strahlung und Bewölkung entwickelt (FEISTER und GERICKE 1998). Zusätzliche Information über die zeitliche Variabilität der Wolken und ihres Einflusses auf den Strahlungshaushalt wird seit 2003 in Lindenberg durch Bildaufzeichnung der Wolkenverteilung des Himmels in hoher Zeitauflösung mit einem **W**hole **S**ky **I**mager (WSI) gewonnen (FEISTER et al. 2001). Die aus bodengebundenen Messungen im Abstand von 2 bis 10 min mit Algorithmen zur Wolkenbestimmung abgeleiteten makroskopischen Wolkenparameter sind nicht nur als klimatologisch repräsentative Information über die zeitliche Variabilität der Bewölkung und ihrer Struktur wertvoll, sondern bieten auch die Möglichkeit der Validierung der aus Satellitenmessungen abgeleiteten Bewölkungsdaten. Mit der aus WSI-Messungen am MOL bestimmte Strahldichteverteilung des bewölkten Himmels in verschiedenen Spektralbereichen des sichtbaren und nahen Infrarotbereichs können Aussagen über die Streuung der Solarstrahlung durch Wolken in hoher Zeitauflösung getroffen werden, die für die Entwicklung von Parameterisierungsbeziehungen der Streueigenschaften von Wolken hilfreich sein können. Die Abb. 3-6 zeigt zwei mit dem Whole Sky Imager mit einem Zeitabstand von 10 min in Lindenberg erfasste Verteilungen der Strahldichte im roten Spektralbereich in W m^{-2} sr^{-1} μm^{-1} an rund 950.000 Himmelspositionen (980 x 980 Pixel mit einem Winkelabstand von 0,15° bis 0,25°). Die Abbildung illustriert die durch Wolken bedingte sehr kleinräumige und kurzzeitige Variabilität der diffusen Himmelsstrahlung, die sich durch kalibrierte bildoptische Messverfahren erschließen lässt. In dem gezeigten Beispiel führten die in der Nähe der Sonnenposition befindlichen Stratocumuluswolken und aufziehende Altocumuluswolken und ihre von der Wellenlänge abhängige Rückstreuung von der Erdoberfläche (FEISTER und GREWE 1995) zur einer Erhöhung der Strahldichte um mehr als das 10-fache im Vergleich zu den in wolkenlosen Himmelsteilen zu erwartenden Werten, wobei die Helligkeit des gesamten Himmels und die Globalstrahlung (hier nicht dargestellt) um etwa 15–20 % gegenüber wolkenlosen Werten erhöht waren.

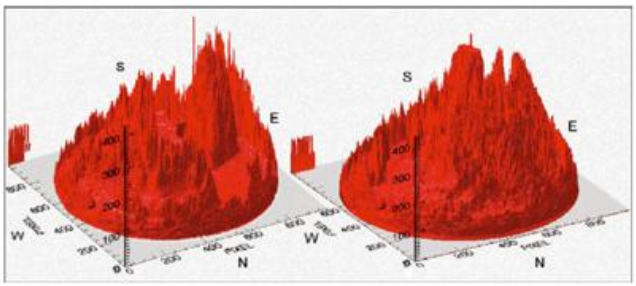


Abb. 3-6: Strahldichten in W m^{-2} sr^{-1} μm^{-1} an etwa 950.000 Himmelspositionen (980 x 980 Pixel) im Winkelabstand von 0,15°–0,25° im roten Spektralbereich nach Messwerten des Whole Sky Imagers in Lindenberg.

Neben den spektralen Messungen im UV und im VIS/NIR mit dem WSI werden im VIS und NIR die spektrale Globalstrahlung und die spektrale diffuse Sonnenstrahlung (MFRSR, BAS), die spektrale direkte Solarstrahlung (ROBAS, SP1A und PFR) sowie spektrale Streukoeffizienten (Nephelometer) gemessen. Da diese Größen stark von den optischen Eigenschaften der atmosphärischen Aerosole abhängen, können umgekehrt diese Eigenschaften aus den genannten Strahlungsmessungen abgeleitet werden. Zwei Abb. zeigen dies exemplarisch: Die Abb. 3-7 verdeutlicht, wie globale Prozesse (vulkanische Aerosole in der Stratosphäre nach dem Pinatobo-Ausbruch 1991) die Trübung, hier gezeigt an der optischen Dicke

Abb. 3-7: Einfluss des Pinatubo-Ausbruchs 1991 auf den (stark geglätteten) Verlauf der optischen Dicke der Aerosole bei 1 µm Wellenlänge.

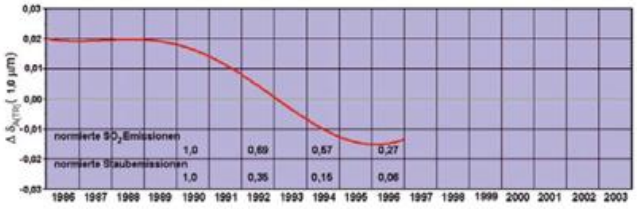


Abb. 3-8: Änderung der optischen Dicke der troposphärischen Aerosole bei 1 µm Wellenlänge vor (1986–1990) und nach (1991–1996) der Reduktion von Staub- und SO_2-Emissionen in Ostdeutschland gegenüber dem Mittelwert (Null-Linie) des Gesamtzeitraums 1986–1996.

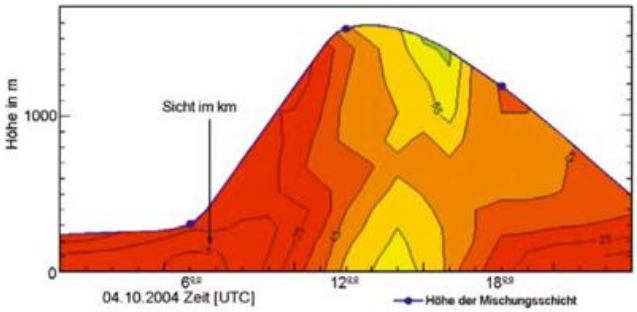


Abb. 3-9: Vertikalprofil der Horizontalsicht nach Koschmieder innerhalb der Mischungsschicht, abgeleitet aus spektralen Nephelometermessungen, Feuchtefeldern des LM des DWD und daraus berechneten feuchteabhängigen Aerosol-Streukoeffizienten.

bei 1 µm, beeinflussen und letztlich Änderungen des Strahlungstransports bzw. des sog. Strahlungsforcings bewirken. Eine Abschätzung des Strahlungsforcings im VIS/NIR am Oberrand einer wolkenlos angenommenen Atmosphäre, d. h. der dort durch Aerosole erzeugten Änderung der Nettostrahlung gegenüber dem aerosolfreien Fall, ergibt z. B. für winterliche Verhältnisse an den Standorten Zingst (repräsentativ für die Küstenregion) und Lindenberg (charakteristisch für das Norddeutsche Tiefland und die östlich und westlich angrenzenden Regionen ähnlicher Breite), für den Hohenpeißenberg (Höhenlagen) und die Zugspitze (alpines Hochgebirge) etwa –8,5 W/m², –2 W/m² und –0,3 W/m², wenn man annimmt, dass die Aerosole nicht absorbieren. Würden etwa 10 % der einfallenden Strahlung durch die Aerosole absorbiert, verringerte sich das Forcing auf –6 W/m² bzw. würde sein Vorzeichen in den Höhenlagen und im Hochgebirge mit +0,5 W/m² und +0,6 W/m² sogar umkehren.

Abb. 3-8 lässt erkennen, wie regionale Prozesse (drastisch reduzierte SO_2- und Staubemissionen im ostdeutschen Raum nach der Wiedervereinigung Deutschlands) zu einer deutlichen Abnahme der Trübung bzw. der optischen Dicke der Aerosole in der Troposphäre geführt haben.

Die Verwendung der spektralen **a**erosol-**o**ptischen **D**icke (AOD) als Vergleichsgröße für das entsprechende Satellitenprodukt zeigte, dass die ganzjährige Verwendung konstanter Werte für die Modellierung des UV-Index unzulänglich ist und dass insbesondere der Messstandort am Boden repräsentativ für die jeweilige Satellitenszene sein muss.

Die Abb. 3-9 ist ein Beispiel, wie aus Messung (Nephelometer) und Modell (Feuchtewachstum der Aerosole und LM des DWD) als Endprodukt Höhen-Zeitschnitte der Horizontalsicht (Isolinien) in Abhängigkeit der relativen Feuchte innerhalb der Mischungsschicht angegeben werden können.

Literatur

BEHRENS, K., K. DEHNE, 2000: Investigations of Night-time Zero Offsets at Short-wave Broadband Radiometers. Papers Presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2000); Beijing, China, 23-27 Oct. 2000. WMO/TD. 1028, 112-115.

BEHRENS, K., K. GERICKE., 2001/2002: A comparison between measured and calculated values of atmospheric longwave radiation. *Idöjaras* **105/106**, 219-230.

BEHRENS, K., 2002: A comparison of atmospheric long-wave radiation measured with a precision infrared radiometer (PIR) and a CG4. Paper Presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observations (TECO-2002); Bratislava, Slovak Republic, 23-25 Sep. 2002, WMO/TD.1123, (CD-ROM).

DOBSON, G. M. B., D. N. HARRSION, 1925: Measurements of ozone in the upper atmosphere. *Quart. J. R. Met. Soc.* **51**, 363-369.

DUBOIS, P., 1993: Das Observatorium Lindenberg in seinen ersten 50 Jahren, 1905–1955, Offenbach a. M.: Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes „Geschichte der Meteorologie in Deutschland", Bd. 1, 374 S. (Manuskript etwa 1957 fertiggestellt).

FEISTER, U., 1994: Measurements of chemically and biologically effective radiation reaching the ground. *J Atmospheric Chemistry* **19**, 289-315.

FEISTER, U., R. GREWE, 1994: Higher UV radiation inferred from low ozone levels at northern mid-latitudes in 1992 and 1993, *Global and Planetary Change* **11** (1/2), 25-34.

FEISTER, U., R. GREWE, 1995: Spectral albedo measurements in the UV and visible region over different types of surfaces. *Photochemistry and Photobiology* **62**, 736-744.

FEISTER, U., K. GERICKE, 1998: Cloud flagging of spectral irradiance measurements. *Atmospheric Research* **49**, 115-138.

FEISTER, U., E. JÄKEL, K. GERICKE, 2002: Parameterization of daily solar global ultraviolet irradiation. *Photochemistry and Photobiology* **76**, 281-293.

FEISTER, U., J. SHIELDS, M. KARR, R. JOHNSON, K. DEHNE, M. WOLDT, 2001: Ground-based cloud images and sky radiances in the visible and near infrared region from Whole Sky Imager measurements. SAF Training Workshop – Climate Monitoring. Dresden, 20–22 November 2000. EUMETSAT. EUM P31. 79-88.

FEISTER, U., A. KAIFEL, R.-D. GREWE, J. KAPTUR, O. REUTTER, M. WOHLFART, K. GERICKE, 2003: First performance results of two novel spectroradiometers developed for fast scanning of solar spectral UV irradiance. SPIE. San Diego, CA., Vol. 5156-18, 123-134.

FOITZIK, L.,1952: Die Reichweite von Scheinwerfern unter Berücksichtigung der atmosphärischen, optischen und physiologischen Einflüsse, *Abh. d. MHD. d. DDR* Nr. 9, Bd. 2, 79 S.

FOITZIK, L., 1946: Theorie der Schrägsicht. *Z. f. Met.***1**, 161-175.

FOITZIK, L., H. HINZPETER,1958: Sonnenstrahlung und Lufttrübung, Akademische *Verlagsgesellschaft Geest & Portig K.-G.*, Leipzig, 309 S.

HERGESELL, H., 1919: Die Strahlung der Atmosphäre unter Zugrundelegung von Lindenberger Temperatur- und Feuchtigkeitsmessungen, Arbeiten des Preußischen Aeronautischen Observatoriums, Band XIII.

KOEPKE, P., H. DE BACKER, P. ERIKSEN, U. FEISTER, D. GRIFONI, T. KOSKELA, A. LEHMANN, Z. LITYNSKA, A. SCHMALWIESER, H. STAIGER, K. VANICEK, 2001: An overview of the results from the comparison of UV-index forecasted and measured at all atmospheric conditions including clouds, in IRS 2000: Current Problems in Atmosph. Radiation, W. L. Smith a. Y. M. Timofeyev (Hrsg.) *Deepak Publ. Hampton*, Virg., 1181-1184.

KÖRBER, H.-G., 1993: Die Geschichte des Meteorologischen Observatoriums Potsdam, Offenbach a.M.: Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes „Geschichte der Meteorologie in Deutschland", Bd. 2, 129 S.

KOSCHMIEDER, H., 1925: Theorie der horizontalen Sichtweite, *Beitr. z. Phys. d. fr. Atm.* **12**, 33.

LEITERER, U., M. WELLER, 1988: Sunphotometer BAS/ABAS for Atmospheric Research. WMO/TD-No.222, 21-26.

LEITERER, U.,G. ALEKSEEVA,V. GALKIN, H. DIER, J. GÜLDNER, A. NAEBERT, T. NAEBERT, V. NOVIKOV, H. RENTSCH, G. SAKUNOV, 1998: Water Vapor Column Content and Optical Depths Measurements by a Sun- and Starphotometer, *Contr. Atmos. Phys.* **71**, 401-420.

MARTEN, W., 1933: Aktinometrische Messungen der Strahlung der Sonnenumgebung und Vergleichsmessungen zwischen den Basisinstrumenten S.I.V bis Washington und S.I. XII Potsdam, Bericht über die Tätigkeit des Pr. Meteorol. Inst. im Jahre 1933, 96-100.

NECKEL, H., D. LABS, 1984: The Solar Radiation between 330 and 12500 A., *Solar Physics* **90**, 205-258.

OHMURA, A., E. G. DUTTON, B. FORGAN, C. FRÖHLICH, H. GILGEN, H. HEGNER, A. HEIMO, G. KÖNIG-LANGLO, B. McARTHUR G. KÜLLER, R. PHILIPONA, R. PINKER, C. H. WHITLOCK, K. DEHNE, M. WILD, 1998: Baseline Surface Radiation Network (BSRN/WCRP): New precision radiometry for climate research. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **79**, 2115-2136.

PHILIPONA, R., C. FRÖHLICH, C. BETZ, 1995: Characterization of pyrgeometers and the accuracy of atmospheric longwave radiation measurements. *Appl. Opt.* **34**, 1598-1605.

STAIGER, H. G. VOGEL, U. SCHUBERT, 1997: UV index calculation by the Deutscher Wetterdienst and dissemination of UV index products. Global Atmosphere Watch ; WMO/TD, 921 – 127, 89-93.

WELLER, M., U. LEITERER, 1988: Experimental Data on Spectral Aerosol Optical Thickness and ist Global Distribution. *Contr. Atmos. Phys.* **61**, 1-9.

WMO, 1996: Guide to meteorological instruments and methods of observation. WMO-No. 8, 6th ed.

promet, Jahrg. 31, Nr. 2–4, 129-133 (Oktober 2005)
© Deutscher Wetterdienst 2005

U. LEITERER

4 Fortschritte in der Aerologie und Wetterbeobachtung am Meteorologischen Observatorium Lindenberg

Improvements in the field of aerology and in the weather observation at the Meteorological Observatory Lindenberg

Zusammenfassung
Es wird insbesondere über Fortschritte der aerologischen Messtechnik im letzten Jahrzehnt berichtet. Zunächst wird auf die Messung der Parameter Druck, Temperatur und Wind eingegangen. Ausführlich werden die Verbesserungen auf dem Gebiet der Feuchtemessung dargestellt. Im letzten Unterabschnitt 6 werden erste Ergebnisse von Zeitreihen der relativen Feuchte präsentiert, z. B. 100 Jahre für das Druckniveau 850 hPa und 45 Jahre für das 300-hPa-Niveau.

Abstract
It will be reported on progress in aerological measuring technique during the last decade. Firstly the measurement of the parameters pressure, temperature and wind will be discussed shortly. The improvements in the field of humidity measurements are described some more in detail. In the last section first results of time series of the relative humidity measurements are presented, e. g. 100 years for the pressure level 850 hPa and 45 years for the 300 hPa level.

1 Einleitung

Die Wetterbeobachtung im bodennahen Bereich (2 m Messhöhe an den synoptischen Stationen) und die Wissenschaft von der Wetterbeobachtung in der freien Atmosphäre bis zur Tropopause und darüber hinaus (die Aerologie[1]), d. h. in der Troposphäre und Stratosphäre haben 100-jährige Tradition am MOL. Insbesondere wurde im Kapitel 1 dieses Heftes schon ausführlich auf die Historie des MOL sowie die wissenschaftlichen und die „Messaktivitäten" eingegangen. Neben dem in Kapitel 7 ausführlich beschriebenen Messkomplex für die Lindenberger Wetterstation wurde die Wolkenbeobachtung in Lindenberg durch spezielle Vaisala-Ceilometer LD-40 „Tropopauser" ergänzt. Für diese Ceilometer wurde ein „Forschungs-Messregime" entwickelt, mit dem es möglich ist, mit hoher Zuverlässigkeit auch Cirren unterhalb der Tropopause bis maximal 13 km Höhe zu messen. Zur Zeit (2005) sind drei derartige Ceilometer im Bereich des Lindenberger Observatoriums im Einsatz und unterstützen die Augenbeobachtungen durch den Wettertechniker an der Wetterstation, siehe MÜNKEL et al. 2001. Hier soll nur über einige wesentliche Fortschritte und bestehende Probleme bei der in situ Messung der meteorologischen Parameter Druck, Temperatur, Feuchte und Wind mittels Radiosonden in der freien Atmosphäre berichtet werden.

2 Parameter Druck

In der Vergangenheit wurde die Druckmessung meist mit Aneoriddosen realisiert, zum Teil auch mit Hypsometern. In jüngster Zeit (RS80 seit 1992 und RS92 seit 2004 in Lindenberg) wurde von der Firma Vaisala der sogenannte „Barocap", ein auf kapazitivem Messprinzip messender Drucksensor, eingeführt. Hat man eine sehr genaue Temperatur- und Feuchtemessung sowie eine präzise Höhenbestimmung (in km, z. B. mit GPS), lässt sich das Druckniveau [in hPa] der Radiosonde mit der barometrischen Höhenformel exakt berechnen. Obwohl die Auflösung[2] eines modernen Drucksensors durchaus bei ±0,0001 hPa liegt, ist die Absolutgenauigkeit derzeit noch auf ±0,5 hPa beschränkt. So entspricht diese Messunsicherheit des Barocap im Höhenniveau bis 35 km noch einem „Höhenfehler" von 400 bis 500 m, während die aus dem US-amerikanischen GPS-System verfügbare GPS-Höhe derzeit einen Fehler von nur ±30 m hat.

3 Parameter Temperatur

Die Temperaturmessung erfolgte in den ersten 70 Jahren (seit 1905) an der Station Lindenberg meist mit Bitmetallthermometern verschiedener Ausfertigung, sowohl bei den gefesselten Drachen- und Drachenbal-

[1] Die Aerologie, ein Teilgebiet der Meteorologie, ist die Wissenschaft von der Erforschung der physikalischen und chemischen Zustände und Vorgänge in der Erdatmosphäre, siehe HESSE 1961 und wurde durch KÖPPEN 1907 in den Sprachgebrauch eingeführt.

[2] Die Auflösung eines Sensors sollte immer um eine Größenordnung besser sein als die angestrebte Messgenauigkeit (gilt für alle Parameter wie Druck, Temperatur, Feuchte, Wind). Dies bedeutet z. B. für das 5-hPa-Niveau, falls man eine Höhengenauigkeit von 10 m anstrebt, dass der Druck mit einer Genauigkeit von 0,001 hPa gemessen werden muss.

lonaufstiegen als auch bei den Radiosondentypen LANG und FREIBERG. Ab 1972 wurde die Temperaturmessung mit einem Thermistor (sowjetische Sondentypen RKS und MARZ) durchgeführt. Mit Einführung der finnischen Radiosonden (RS80 und RS92) wurden Thermocap's als Temperatursensoren verwendet (kapazitives Messprinzip), die auf Grund der geringen Abmaße und Masse einen wesentlich geringeren Strahlungs- und Trägheitsfehler als die früheren Temperatursensoren haben. Die Temperaturmessung kann mit einer Auflösung von ±0,001 K realisiert werden. Doch treten bei der Temperaturbestimmung in der mittleren Stratosphäre bei 35 km immer noch Messunsicherheiten von ±2 K auf, die durch ungenügende Korrekturen bzgl. des Strahlungsfehlers, des Trägheitsfehlers und eines weiteren Fehlers, bedingt durch die Ballon-Warmluftschleppe in dieser Höhe, verursacht sind. Der Ballon hinterlässt z. B. im 5-hPa-Niveau eine mehrere 100 m lange röhrenförmige Warmluftschleppe, durch die die Radiosonde im Abstand von etwa 30 m unterhalb des Ballons hindurchpendelt. Die Temperaturen sind innerhalb der Warmluftschleppe bei 5 hPa über 2 K höher als außerhalb.

4 Parameter Wind

Bei der Windmessung gibt es seit Juli 2004 mit der Verwendung der präzisen Positionsbestimmung des GPS-Empfängers der Radiosonde zur Herleitung von Windrichtung und Windgeschwindigkeit eine deutliche Qualitätsverbesserung, verglichen mit den vorhergegangenen Windmesssystemen, siehe auch Tab. 7-2 in Kapitel 7. Doch haben wir bis heute bei der Windgeschwindigkeit noch nicht erklärbare Differenzen in der Größenordnung von 1-2 m/s zwischen RADAR-Wind und GPS-Wind. Diese Differenzen wurden nur zu bestimmten Tageszeiten und bestimmten Höhenbereichen in der oberen Troposphäre und unteren Stratosphäre während speziell untersuchter Zeitabschnitte im März/April der Jahre 2003 und 2004 festgestellt. Da zur Zeit nur das US-amerikanische GPS-System zur Verfügung steht, muss möglicherweise für die Aufklärung der Messunsicherheiten bis zur Einführung des europäischen GPS-Systems GALILEO im Jahre 2008 gewartet werden.

5 Parameter Feuchte

Für die Feuchtemessung wurden in den ersten 66 Jahren (1905–1971) Haarhygrometer verwendet, sowohl bei den gefesselten Drachen- und Drachenballonaufstiegen als auch bei der Radiosonde. Von 1971–1992 kam die Goldschlägerhaut in Verbindung mit den sowjetischen Radiosondentypen RKS und MARZ zum Einsatz. Ab 1992 mit Einführung der finnischen Sonde RS80 löste der A-Humicap-Sensor der Firma Vaisala die Goldschlägerhaut des sowjetrussischen Systems ab. Der A-Humicap ist ein auf dem kapazitiven Messprinzip basierender Polymersensor.

5.1 Stand der Technik

Die präzise Messung der relativen Feuchte (RH) bzw. des Wasserdampfgehaltes in der freien Atmosphäre ist ein bis heute noch nicht befriedigend gelöstes messtechnisches Problem. Die aktuelle Situation soll anhand der Abb. 4-1 veranschaulicht werden.

Mit Hilfe des in Lindenberg entwickelten „FN-Verfahrens" (siehe Unterabschnitt 5.2) war es möglich, eine Referenz-Feuchtesonde in Lindenberg zu etablieren und mit dieser seit Juli 1999 einmal wöchentlich Simultanaufstiege an einem Ballon gemeinsam mit der Routineradiosonde RS80 (A-Humicap als Sensor) zu fliegen. Auf der Grundlage dieser Vergleiche wurde für die weltweit verbreitete operationelle Radiosonde RS80-A ein Korrekturverfahren entwickelt, siehe LEITERER et al. 2005. Das Ergebnis dieses Korrekturverfahrens, angewendet auf die operationellen Radiosondenaufstiege in Lindenberg, ist in Abb. 4-1 b dargestellt. Nach Anwendung dieser Korrektur haben die RS80-A-Feuchteprofile nur noch einen geringen Trockenbias von maximal 2 % RH in der Grenzschicht zwischen 0 und 1 km Höhe. In der Troposphäre sind die korrigierten RS80-A-Feuchteprofile nahezu ohne systematischen Messfehler und haben eine Qualität, dass sie als Grundlage zur Herleitung von Zeitreihen der relativen Feuchte in der freien Atmosphäre verwendet werden können, siehe Abb. 4-8.

In Abb. 4-1 sind auch die systematischen Messfehler für die beiden weltweit am meisten verbreiteten Sensortypen RS80-A (siehe Abb. 4-1 a) und Goldschlägerhaut (siehe Abb. 4-1 c) dargestellt. So beträgt die Differenz zwischen den Goldschlägerhaut- und den A-Humicap-Radiosondenmessungen in der oberen Tro-

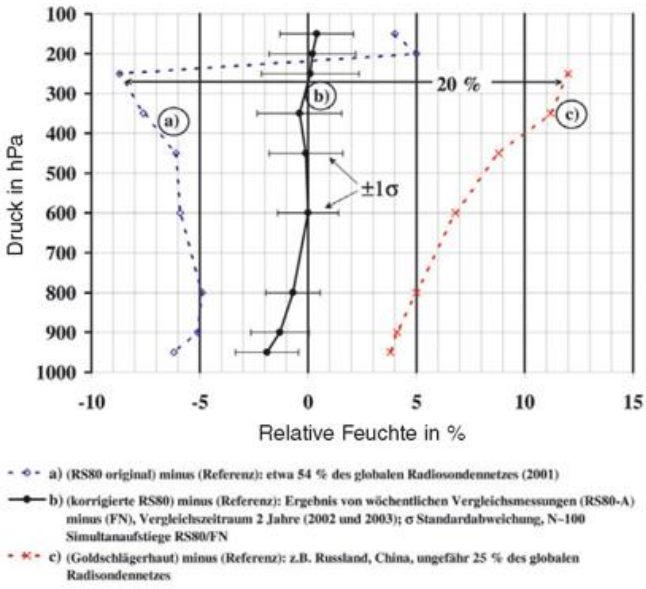


Abb. 4-1: Mittlere Abweichungen der Messungen der relativen Feuchte mit den Sensortypen A-Humicap (RS80-A) bzw. Goldschlägerhaut (MARZ, SHANG) von der Referenz (FN-Sonde).

posphäre im Cirrusniveau bei 300 hPa etwa 20 % RH. Ein systematischer Feuchteunterschied von 20 % RH zwischen den Vaisala RS80-A-Stationen in der westlichen Welt und den Goldschlägerhautstationen in der östlichen Welt (Russland und China) ist letztlich nicht hinnehmbar.

Feuchtedaten mit einem großen Trockenbias (-8 % RH bei der RS80-A) oder einem großen Feuchtebias (+12 % RH bei der Goldschlägerhaut der russischen und chinesischen Radiosondentypen) sind für die Datenassimilation und Verwendung in den Wettervorhersagemodellen unbrauchbar. Eine Messgenauigkeit von ±1 % RH insbesondere im Bereich der Eissättigung ist unbedingt erforderlich, damit die Radiosondenfeuchtemessungen zur Validierung und als Datengrundlage in den Modellen der numerischen Wettervorhersage verwendet werden können.

Aus oben genannten Gründen wurde in Lindenberg in den letzten Jahren (seit 1994) das im nächsten Abschnitt 5.2 dargestellte Feuchtemessverfahren entwickelt.

5.2 Das FN-Verfahren

Das FN-Verfahren (standardisierte (**n**ormierte) **F**requenzen) verwendet als technologische Grundlage den Sensorbaum der Radiosondengeneration RS90 und nachfolgende der Firma Vaisala, siehe Abb. 4-2. Für das FN-Verfahren wird sowohl die Lufttemperatur (gemessen mit einem Thermocap) als auch die kapazitiv gemessene Messfrequenz der 2 Humicap-Feuchtesensoren benötigt. Die Feuchtesensoren befinden sich abwechselnd im geheizten (60 s) und im Messzustand (160 s).

Abb. 4-3 erläutert schematisch die Wirkungsweise der FN-Methode. FN ist der Quotient von zwei Differenzen: (Frequenz im geheizten Zustand bei der Umgebungsfeuchte U % RH) minus (Frequenz im Messzustand bei der Umgebungsfeuchte U % RH) geteilt durch [(Frequenz im geheizten Zustand bei der Normierungsfeuchte 100 % RH) minus (Frequenz im Messzustand bei der Normierungsfeuchte 100 % RH)]. Die Differenzen im Zähler $F_H(U\ \%)$-$F_M(U\ \%)$ bewegen sich in der Größenordnung von 0 bis 200 Hz je nach Umgebungsfeuchte, die Differenz im Nenner $F_H(100\ \%)$-$F_M(100\ \%)$, die sogenannte Normierungsdifferenz ΔF, hat die Größenordnung von 200 Hz und wird vor Beginn des Radiosondenaufstieges in einer mit etwa 5 m/s (entspricht der Aufstiegsgeschwindigkeit) ventilierten Box und 100 % RH gesättigter Luft bei Zimmertemperatur individuell für jede Radiosonde gemessen. So kann sich der Quotient FN nur zwischen 0,00 und 1,00 bewegen. Dieser Quotient entspricht nun dem Verhältnis von Wasserdampfpartialdruck e zu Sättigungsdampfdruck e_w. Multipliziert man dieses mit 100, erhält man die relativen Luftfeuchte [RH]. Mit diesem sehr einfachen FN-Verfahren kann

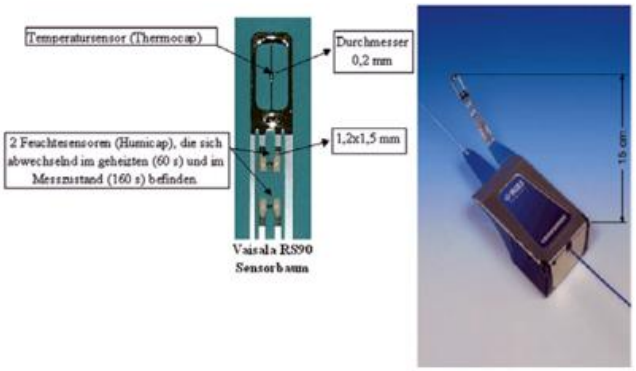


Abb. 4-2: Der Sensorbaum für Temperatur- und Feuchtemessung; die RS90-Radiosonde.

Die FN-Methode: $F_M(100\ \%)$: Frequenz (F) – Information in einer ventilierten Box mit 100 % RH (700 s)
$F_H(U\%)$: Frequenz (F) – Information im geheizten Zustand (60 sec)
$F_M(U\%)$: Frequenz (F) – Information im Messzustand (160 sec)
U% RH der Umgebungsluft
e: Dampfdruck
e_w: Sättigungsdampfdruck

Idee: Verwendung von standardisierten (normierten) Frequenzen

↓ während des Radiosonden-Fluges „in situ Kalibrierung"

$$F_N = \overbrace{\frac{F_H(U\%) - F_M(U\%)}{F_H(100\%) - F_M(100\%)}}^{\Delta F} = 0.00...1.00 = \frac{e}{e_w} \times 100 = RH \quad \text{(relative Feuchte)}$$

0 bis 200Hz

ΔF: für jeden Sensor individuell ermittelte „Normierungs-Frequenz" in der 100 % RH Box, ungefähr 200 Hz

Abb. 4-3: Das Mess- und Auswerteverfahren der standardisierten Feuchtefrequenzen – Die FN-Methode.

nun die relative Feuchte direkt in situ während des Radiosondenfluges bestimmt werden. Die Heizfrequenz $F_H(U\ \%)$ dient als Bezugsfrequenz während des Fluges. Das FN-Verfahren funktioniert dank der Polymereigenschaften in allen in der Meteorologie vorkommenden Messbereichen: Temperatur von +50 bis –95 °C, Druck von Bodendruck (1000 hPa) bis Stratosphärendruck (2 hPa) und Eisübersättigung (z. B. in Cirruswolken) bis zu extrem niedrigem Stratosphären-Wasserdampfdruck (z. B. 1 ppmv).

Mit der Anwendung des FN-Verfahrens steht ein preiswerter Feuchtesensor für alle Anwendungsbereiche in der Meteorologie zur Verfügung. Auch der Dauereinsatz (über Monate) in einer normalen ventilierten Wetterhütte ist möglich.

Um das FN-Verfahren zu einem Referenzverfahren zu qualifizieren war es notwendig, in Lindenberg eine Prüfkammer für Radiosondensensoren zur Simulation von Druck (P), Temperatur (T) und Feuchte (U) unter Aufstiegsbedingungen (Ventilation mit 5 m/s) zu schaffen, insbesondere da im FN-Verfahren noch Korrekturen implementiert sind, die temperatur- und druckabhängig sind. Das Besondere der Lindenberger Prüfkammer ist, dass alle Parameter (P, T und U) variiert und simuliert werden können. Die Parameter P, T und U werden durch zertifizierte Substandards kontrolliert bzw. überwacht.

Die Abb. 4-4 zeigt schematisch die Lindenberger Prüfkammer für Radiosondensensoren.
Die Abb. 4-5 zeigt ein Beispiel für die Genauigkeit der Messungen von Temperatur und relativer Feuchte in der Simulationskammer. Im oberen Teil von Abb. 4-5 ist ein Beispiel für die Feuchtemessung (U-FN) und Feuchtekontrolle (U-TOROS mit Präzisions-Frostpunktspiegel TOROS) dargestellt. Ein Unterschied von ±3 % RH zu der Werkskalibrierung (U-Vaisala) des Polymersensors ist erkennbar. Die Messwerte, hergeleitet mit der FN-Methode (U-FN, RH=50 %), stimmen mit der Referenzfeuchte U-TOROS überein. Aus dem unteren Teil von Abb. 4-5 ist der Unterschied zwischen der Thermocap-Temperaturmessung (T-Vaisala) und der Temperaturreferenz (T-PT 100-Almemo korr. PTB) sichtbar. Die Thermocap-Temperatur des RS90-Sensorbaums (T-Vaisala) liegt nur knapp 0,1 K über der Referenztemperatur. Der Verlauf von T-Vaisala zeigt weiterhin, dass im zeitlichen Abstand von 60–160 s Temperaturspitzen, die durch die abwechselnd beheizten Humicaps (für die Feuchtemessung) hervorgerufen werden, auftreten. Das handelsübliche PT-100-ALMEMO-Thermometer ist nahezu 0,2 K kälter und wurde in speziellen Experimenten im Temperatur-Kalibrierlabor der **P**hysikalisch **T**echnischen **B**undesanstalt der Bundesrepublik Deutschland (PTB) Berlin in Luft und in Flüssigkeiten mit einer Absolutgenauigkeit von ±0,03 K im Temperaturbereich +40 °C bis –68 °C kalibriert. Die Temperaturreferenz ist jetzt der mit „T-PT100-ALMEMO-korr. PTB" gekennzeichnete Wert.

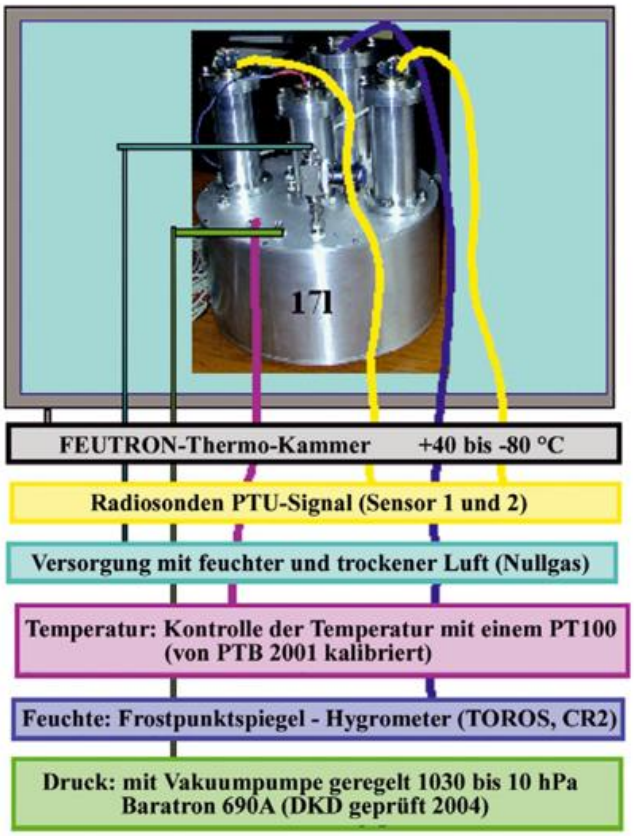


Abb. 4-4: Die Lindenberger Simulationskammer für Radiosondensensoren.

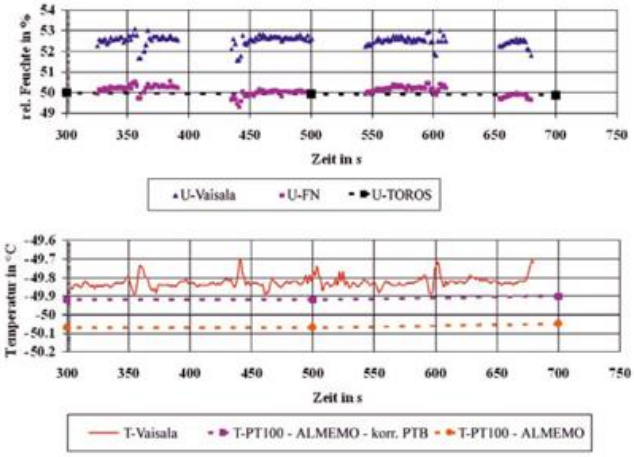


Abb. 4-5: Beispiel für die Genauigkeit der Messungen von Temperatur und relativer Feuchte in der Simulationskammer.

5.3 Korrekturschritte für RS80-A Feuchteprofile

Neben der Einrichtung einer Prüfkammer für Radiosondensensoren und der Entwicklung einer Referenz-Feuchtesonde nach dem FN-Verfahren musste ein in der täglichen Sondierungspraxis anwendbares Korrekturverfahren für die RS80-A-Routineradiosonde geschaffen werden, um die Qualität der täglichen 4 Radiosondenaufstiege zu gewährleisten.

Anhand von Abb. 4-6 sollen die Korrekturschritte für die RS80-Feuchtesondierungen erläutert werden, siehe LEITERER et al. 2005:

1. 10-minütige Regenerierung des RS80-A-Humicapsensor in einer mit 5 m/s ventilierten Box und 100 % RH. Feststellung der Differenz zwischen RS80-Feuchte und 100 % RH und Verwendung dieser Differenz als Bodenkorrektur bei der Korrektur der RH-Profile.
2. Anbringung einer Trägheitskorrektur. Der Unterschied zwischen Originalkurve (U_{org}) und trägheitskorrigiertem Feuchteprofil (U_{lag}) ist aus Abb. 4-6 erkennbar.

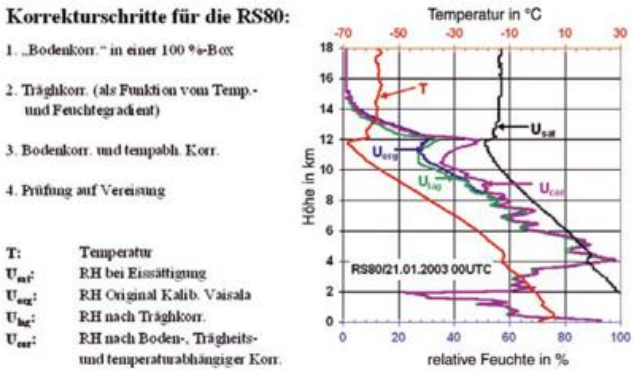


Abb. 4-6: Beispiel für die Korrektur einer Feuchtesondierung mit der RS80 (A-Humicap), 21.01.2003 00 UTC, Meteorologisches Observatorium Lindenberg.

3. Anbringung der temperaturabhängigen Feuchtekorrektur, die durch Vergleiche mit FN-Referenzsonden entwickelt wurde. Das Ergebnis ist das korrigierte Feuchte-Vertikalprofil (U_{cor}).

Während die Original-Feuchtekurve (U_{org}) im Tropopausenniveau bei 10 km nur 32 % RH anzeigt, erreicht die korrigierte Kurve mit 49 % RH nahezu Eissättigung in Tropopausenhöhe bei 12 km (s. Abb. 4-6).

6 Zeitreihen der relativen Feuchte

Nach der Entwicklung geeigneter Korrekturverfahren für die RS80-A war es möglich, korrigierte Messdatensätze zu schaffen, die in ihrer Qualität für Zeitreihenanalysen geeignet sind, siehe auch Kapitel 7.

Abb. 4-7 und 4-8 sind Beispiele für die Zeitreihen der relativen Feuchte, die letztlich korrigierte, qualitätsgesicherte Feuchtedaten und das FN-Verfahren zur Grundlage haben. Während aus Abb. 4-7 eine Feuchtezunahme innerhalb der letzten 50 Jahre von ca. 1,5 % RH in der unteren Troposphäre (etwa 1,5 km) erkennbar ist, zeigt die obere Troposphäre (etwa 9 km) eine Feuchteabnahme um etwa 3 %. Diese Abnahme der

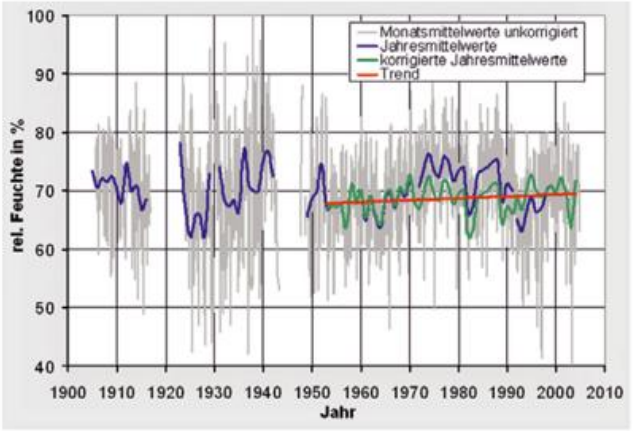


Abb. 4-7: Zeitreihe der relativen Feuchte im 850-hPa-Niveau (etwa 1,5 km), Observatorium Lindenberg.

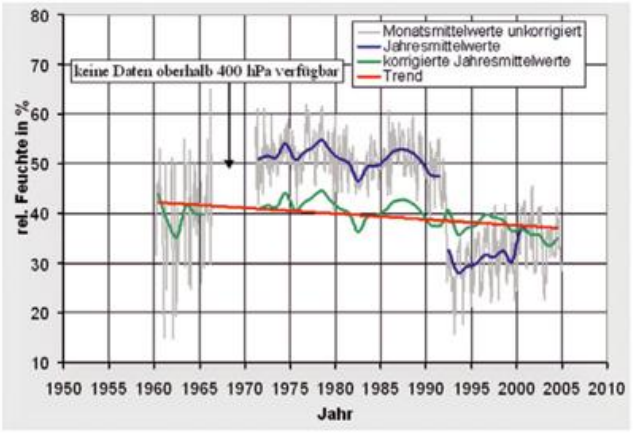


Abb. 4-8: Zeitreihe der relativen Feuchte im 300-hPa- Niveau (etwa 9 km), Observatorium Lindenberg.

Feuchte ist gleichzeitig verbunden mit einer Temperaturabnahme für diese Höhenregion sowie mit einer Erhöhung des mittleren Tropopausenniveaus an der Station Lindenberg. Die Veränderungen/Trends sind besonders im Winterhalbjahr stärker ausgeprägt als im Sommerhalbjahr, was für eine Süd-Verlagerung der Polarfront im Tropopausenniveau bzw. einer südwärts gerichteten Ausdehnung des arktischen Polarwirbels im Druckniveau 200–50 hPa spricht.

7 Ausblick und Schlussbetrachtungen

Das Meteorologische Observatorium Lindenberg hat gegenwärtig auf dem Gebiet der Radiosondierungen, insbesondere für den meteorologischen Parameter Wasserdampf bzw. relative Feuchte eine besondere Expertise und umfangreiche Forschungsergebnisse erreicht, die an keiner anderen Station weltweit vorhanden sind. Dies betrifft nicht nur den Bereich der Troposphäre, sondern auch den Niedrigfeuchtebereich der Stratosphäre bis etwa 4 hPa.

Auch die Aufstiegshöhen konnten dank Einsatz von Ballonen der Fa. TOTEX und der 1200 g TOTEX TX-Serie sowie den sehr leichten RS92 Radiosonden seit Juli 2004 deutlich verbessert werden. Inzwischen wird in über 50 % aller 12 und 00 UTC-Routineaufstiege das 5-hPa-Druckniveau erreicht, eine wichtige Forderung für das GUAN (**G**lobal Climate Observing System **U**pper-**A**ir **N**etwork)-Radiosondennetz. Lindenberg ist seit Januar 2004 eine GUAN-Station und wird innerhalb dieser 161 weltweit geplanten GUAN-Stationen eine Pilot-Rolle als Referenzstation spielen können (s. Kap. 8). Speziell zur Validierung von Satelliteninstrumenten (meistens Radiometer im Mikrowellenbereich) ist auch die Zukunft für eine SUAN (**S**atellite **U**pper-**A**ir **N**etwork)-Station Lindenberg gegeben, deren Aufgabe es sein wird, die notwendigen „ground truth data“ für die Absolutkalibrierung der existierenden und zukünftigen polarumlaufenden Satelliten zu liefern (z. B. NOAA 15, 16, 17).

Literatur

HESSE, W., 1961: Handbuch der Aerologie, Leipzig 1961, Akademische Verlagsgesellschaft GEEST & PORTIG K.G., 897 S.

KÖPPEN, W., 1907: Sitzungsbericht der Internationalen Kommission für wissenschaftliche Luftschifffahrt, Mailand 1906, Straßburg 1907.

LEITERER, U., H. DIER, D. NAGEL, T. NAEBERT, D. ALTHAUSEN, K. FRANKE, A. KATS, F. WAGNER, 2005: A Correction Method for RS80-A Humicap Profiles and their Validation by Lidar Backscattering Profiles in Tropical Cirrus Clouds. *J of Atmospheric and Oceanic Technology (JTECH)* **22**, No. 1, 18-29.

C. MÜNKEL, U. LEITERER, H. DIER, 2001: Affordable Lidar for atmospheric aerosol and cloud studies. In: Singh, U.N., NASA Langley Research Centre (Hrsg.): Lidar Remote Sensing For Industry And Environment Monitoring II. Proceedings of SPIE (Bellingham, Washington, USA) in San Diego, California, USA, 30-31. July 2001, SPIE Vol. 4484.

promet, Jahrg. 31, Nr. 2–4, 134-147 (Oktober 2005)
© Deutscher Wetterdienst 2005

D. ENGELBART

5 Bodengebundene Fernerkundung am Meteorologischen Observatorium Lindenberg

Ground-based remote sensing at the Meteorological Observatory Lindenberg

Zusammenfassung
Die bodengebundene Fernerkundung am Observatorium Lindenberg betreibt ein System aktiver und passiver Fernerkundungssysteme, um alle meteorologischen Grundgrößen wie Wind, Temperatur und Feuchte, aber auch Wolkenparameter, mit hoher zeitlicher Auflösung überwachen zu können. Es werden in knapper Form die eingesetzten Fernerkundungsverfahren, Windprofiler/RASS, Sodar/RASS, Wasserdampf-Raman-Lidar, Ka-Band-Wolkenradar, Mikrowellenprofiler sowie FITR beschrieben und ein Überblick über die damit verbundenen wissenschaftlichen Programme und Ziele gegeben. Am Beispiel einiger Fallstudien werden die Messmöglichkeiten sowie die Datenqualität der Systeme vorgestellt.

Abstract
The department „Ground-based remote sensing" at Lindenberg Observatory runs a complete set of different remote-sensing systems for continuous atmospheric monitoring of wind, temperature, humidity and clouds using active and passive techniques. These techniques involve windprofiler radar/RASS, Sodar/RASS, water-vapour Raman Lidar, Ka-band cloud radar, microwave systems, and the FTIR. The chapter briefly describes all different basic systems together with a short overview on the major scientific objectives and programmes in which they are involved and gives examples of their measuring capabilities and data quality.

1 Einleitung

Mit den verbesserten Möglichkeiten der numerischen Modellierung bzw. der Datenassimilation als einem der Hauptnutzer kontinuierlicher aerologischer Messdaten werden für alle meteorologischen Grundparameter heute zeitlich dichtere Messungen gefordert. Die Radiosondierung als bis heute übliches Standardmessverfahren in der Aerologie (s. Kap. 4) kann diese Forderung nach einer häufigeren Datenbereitstellung, d. h. höheren zeitlichen Auflösung, bei Berücksichtigung der Materialkosten sowie des erforderlichen Personalaufwandes jedoch nicht erfüllen. In den operationellen Wetterdiensten sowie in verschiedenen Forschungsinstitutionen werden daher bereits seit über 20 Jahren weltweit Anstrengungen unternommen, um ergänzende bzw. alternative Messverfahren zu qualifizieren. In diesem Zusammenhang werden auch am Meteorologischen Observatorium Lindenberg des DWD systematische Untersuchungen mit neuen aerologischen Messverfahren durchgeführt, die neben Fragen der Eignung einer Einbindung in operationelle Netze auch auf eine langfristige Überwachung der Atmosphäre hinsichtlich ihrer physikalischen Struktur zielen sowie als Datenbasis zur Validierung numerischer Modelle dienen.

Im Hinblick auf die Eignung für operationelle Messnetze stehen vor allem Fragen der zeitlichen und vertikalen Auflösung sowie der Datenqualität im Vordergrund. Parallel dazu sind Untersuchungen durchzuführen, bei denen der Einfluss der verbesserten zeitlichen Auflösung auf die Qualität von numerischen Analysen sowie Vorhersagen einerseits, aber auch der Nutzen für die Wetterüberwachung (Synoptik und Flugwetterberatung) zu quantifizieren ist. Dabei wird seitens der Gerätetechnik im DWD keine Eigenentwicklung betrieben, sondern auf kommerziell verfügbare Systeme zurückgegriffen, die gegebenenfalls nach den speziellen Anforderungen des Observatoriums Lindenberg angepasst werden.

Neben der gegenwärtig vor allem für die Wind-Profil-Radarsysteme bestehenden Aufgabe der Datengewinnung für die operationellen numerischen Modelle des DWD werden grundsätzlich alle Systeme des Observatoriums im Rahmen der Klimaüberwachung als Monitoringsysteme eingesetzt. Das Messprogramm der bodengebundenen Fernsondierung umfasst dabei neben den meteorologischen Grundgrößen Wind, Temperatur und Feuchte insbesondere einige spezielle Parameter der physikalischen Struktur der Atmosphäre, die wegen ihrer Komplexität und/oder Kosten nicht im Rahmen der operationellen Messnetze erfasst werden können. Die Ergebnisse dieses Monitoring-Programms dienen darüber hinaus der Bereitstellung von Daten für nationale, europäische (aktuell z. B. COST-720, EUMETNET-WINPROF (**Windprof**iler-Netz), CloudNET, u. a.) und globale Mess- oder Forschungsprogramme (s. Kap. 8), wobei das globale Wasserdampf-Forschungsprojekt der WMO (GEWEX „GVaP" – WMO 1999) eine besondere Bedeutung hat und generell für alle Programme auch umfangreiche Forschungsaktivitäten im Rahmen von Prozessstudien realisiert wer-

den. Einen Schwerpunkt bilden methodische Untersuchungen neuartiger boden- oder satellitengestützter Messverfahren, für deren Messgrößen die „Bodengebundene Fernerkundung" des Observatoriums mit qualitätsgeprüften und damit belastbaren Daten die Referenz für Kalibrierung, Validierung oder Verifikation bereitstellt (DWD 2000 – CM-SAF). Die kontinuierliche Überwachung und Bewertung der Datenqualität aller Fernmesssysteme des MOL stellt insofern eine wesentliche Kernaufgabe des Observatoriums dar.

In der Gesamtheit seiner Messeinrichtungen stellt das Observatorium Lindenberg damit, ähnlich der ARM-CART (**A**tmospheric **R**adiation **M**easurement – **C**loud **a**nd **R**adiation **T**estbed)-Einrichtung nahe Lamont, Oklahoma (USA), eine einzigartige wissenschaftliche Institution dar, die auch im Rahmen internationaler Aufgaben (insbes. WMO) für Validierungskampagnen numerischer Modelle und Systemvergleiche genutzt wird. Die folgenden Abschnitte werden dazu in knapper Form die wesentlichen bodengebundenen Fernerkundungssysteme am Observatorium Lindenberg vorstellen, mit denen die zuvor erwähnten Einzelaufgaben realisiert werden.

2 Vertikalsondierung des Windes und der Temperatur mit Hilfe von Wind-Profil-Radar/RASS und Sodar/RASS

Mit der Installation der beiden **W**ind-**P**rofil-**R**adaranlagen (WPR) am MOL sowie des Sodar (**So**nic **d**etection **a**nd **r**anging) auf dem **G**renzschicht-**M**essfeld (GM) steht dem Observatorium für aerologische Windmessungen seit Anfang 1998 ein Wind-Monitoringsystem für die gesamte Troposphäre zur Verfügung, das durch die Erweiterung aller drei Systeme mit **R**adio-**A**kustischen **S**ondierungs**S**ystemen (RASS) auch Messungen der virtuellen Temperatur bis max. 4 km Höhe ermöglicht. Durch Kombination der Einzelsysteme können dabei vertikal lückenlose Wind- und Temperaturprofile mit hoher Zeitauflösung („composite profiling" – GÖRSDORF et al. 2002) erstellt werden. Im Rahmen eines solchen kombinierten Monitoringsystems bieten Sodargeräte den Vorteil einer hohen Vertikalauflösung (s. Tab. 5-1), wobei maximale Messhöhen bis in einige hundert Meter über Grund erzielt werden (ENGELBART et al. 1999). Im Vergleich dazu erzielen Wind-Profil-Radarsysteme bei reduzierter Auflösung Reichweiten zwischen 2–4 km (1290 MHz WPR – ENGELBART et al. 1996) und 12–16 km (482 MHz WPR – STEINHAGEN et al. 1998), siehe Abb. 1-31 und 38. Zur Veranschaulichung der Leistungsfähigkeit der WPR-Systeme bzw. des Doppler Sodar am Meteorologischen Observatorium Lindenberg sind in Tabelle 5-1 die wesentlichen technischen Parameter dieser Systeme zusammengefasst.

Im Gegensatz zu den weit besser bekannten Niederschlagsradarsystemen, die mit ausgesendeten Signalen im Zentimeter- bis Dezimeterbereich arbeiten, eignen sich Signale mit längerer Wellenlänge – im Dezimeter- und Meterbereich – auch zur Detektion von (clear-air-) Streuung aus der wolken- und niederschlagsfreien Atmosphäre (GAGE 1990; OTTERSTEN 1969). Die Ursache hierfür sind turbulente Inhomogenitäten des atmosphärischen Brechungsindex (Schlieren), die durch Schwankungen der Wasserdampfkonzentration und der Temperatur verursacht werden. Bei Wellenlängen von mehr als 3 m dominieren dann partielle Reflexionen an Schichtgrenzen in der Atmosphäre (TATARSKII 1961).

Soweit die zur Streuung beitragenden Strukturen keine oder nur eine geringe Eigenbewegung besitzen, werden sie mit dem mittleren Wind getragen und kön-

	482 MHz WPR	482 MHz Bragg-RASS	1290 MHz WPR	1290 MHz Bragg-RASS	Sodar	1290 MHz Doppler-RASS
Betriebsfrequenz	482,0078 MHz	1000–1150 Hz	1290 MHz	2700–3000 Hz	1500–3000 Hz	1290 MHz
Puls-Spitzenleistung	16 kW	4 x 20 W	500 W	150 W	1 kW	100 W
Effektive Antennenfläche	140 m²	2,5 m²	6,8 m²	1,8 m²	1 m² (Phased array)	1,9 m² (parabolisch)
Antennengewinn	35 dBi	25 dBi	30 dBi	30 dBi	24–29 dB *	26,5 dB
Strahlbreite (3 dB, one way)	3°	etwa 12°	6°	12°	6,8–12° *	9°
Anzahl Strahlrichtungen	max. 5	4 x 1	max. 5	1	max. 5	1
Zenitdistanz	15°	–	15,5	–	14°–28° *	–
Vertikalauflösung	Low-Mode: 250 m High-Mode: 500 m	250 m	Low-Mode: 100 m High-Mode: 400 m	100 m	5–50 m	5–20 m
Vertikaler Messbereich	Low Mode: 0,5–8 km High Mode: 3–18 km	0,5–4 km –	Low Mode: 0,2–2 km High Mode: 0,4–4 km	0,2–1,2 km –	20–500 m	20–400 m
Mittelungsperiode (1 Profil)	10–60 min (typ.: 30 min)	5–10 min, alle ½ h	10–60 min (typ.: 30 min)	5–10 min, alle ½ h	5–60 min (typ.: 15 min)	5–60 min (typ.: 15 min)

Tab. 5-1: Ausgewählte Systemparameter der beiden WPR/RASS sowie des Sodar/RASS am Observatorium Lindenberg des DWD (*-Werte hängen von der verwendeten akustischen Betriebsfrequenz ab).

nen als Indikator (Tracer) für den Wind im Streuvolumen verwendet werden. Auch Niederschlagspartikel eignen sich als Tracer, allerdings nur für den mittleren horizontalen Wind, nicht dagegen für die Vertikalwindkomponente. Grundlagen der Fernmessung von Wind- und Temperaturprofilen mit WPR/RASS finden sich z. B. in DIBBERN (2001), DOVIAK und ZRNIC (1993), bei GAGE (1990) oder in VDI (2005).

Eine Ergänzung der WPR stellen die **R**adio-**A**kustischen **S**ondierungs **S**ysteme (RASS) zur Ableitung des Vertikalprofils der virtuellen Temperatur dar (PETERS et al. 1983). Dabei werden die streuenden Strukturen künstlich, d. h. mit Hilfe von Schallwellen, erzeugt. Die Geschwindigkeit dieser streuenden Strukturen setzt sich dabei aus der Schall- und der Windgeschwindigkeit zusammen. Da die Ausbreitung des ausgesandten Schallsignals im Wesentlichen nur von der Temperatur sowie von der Windgeschwindigkeit abhängig ist, lässt sich aus der Messung der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schallsignals das Temperaturprofil (MAY et al. 1990) ableiten. Bei einer interferometrischen Erfassung des windbedingten Transports des Schallsignals ist alternativ dazu mit Hilfe von RASS auch die Bestimmung des Windvektors möglich (HIRSCH 2002). Der Vorteil von RASS-Systemen besteht in der Unempfindlichkeit gegen verschiedene Störungen, die das WPR beeinträchtigen können, wie z. B. Echos von Vögeln (ENGELBART et al. 1998) oder von Bodenstrukturen, die von Nebenkeulen des Radarstrahls getroffen werden. Die vertikale Reichweite des RASS gegenüber dem WPR ist jedoch aufgrund der stärkeren Dämpfung des akustischen Signals sowie des Windversatzes mit der horizontalen Windgeschwindigkeit deutlich geringer.

Generell arbeiten WPR-Systeme im VHF- und im UHF-Frequenzbereich (40 MHz bis 1400 MHz bzw. 7,5 m bis 0,21 m Wellenlänge) hauptsächlich nach der Doppler-Methode, dem so genannten **D**oppler-**B**eam-**S**winging (DBS) (WOODMAN und GUILLEN 1974) oder aber nach interferometrischen, so genannten **S**paced-**A**ntenna-(SA-)Verfahren (BRIGGS 1980; BRIGGS 1984). Das Messprinzip beruht auf der Rückstreuung elektromagnetischer Wellen an Strukturen des Brechungsindexfeldes im o. g. Frequenzbereich. Das WPR erfasst Amplitude und Phase des gestreuten, bzw. im Meterwellenbereich auch des partiell reflektierten Signals und damit das komplexe Frequenzspektrum des Empfangssignals. Die Echos erfahren je nach verwendeter Sendefrequenz und Strahlneigung eine zur Windgeschwindigkeit proportionale Dopplerverschiebung.

WPR-Systeme emittieren Pulse elektromagnetischer Strahlung. Nach dem Aussenden jedes einzelnen Pulses mit der Pulsdauer Δt wird das Rückstreusignal in bestimmten Zeitintervallen, d. h. in definierten Höhenintervallen bzw. Höhenschichten, abgetastet. Als Bezugspunkt einer bestimmten Höhenschicht wird dabei die Schichtmitte angegeben. Nur bei vertikaler Strahlrichtung sind Entfernung x und Höhe z identisch. Bei geneigten Strahlen gilt dagegen $z = x \cos \alpha$. Ebenso gilt für die Höhenauflösung (Entfernungsauflösung) $\Delta z = \Delta x \cos \alpha$. Aufgrund der geringen Zenitdistanz α wird jedoch beim WPR in der Regel nicht zwischen z und x bzw. Δz und Δx unterschieden.

Die in der freien Atmosphäre gestreuten Signale sind oft extrem schwach. Messungen sind deshalb nur möglich, wenn die empfangene Leistung eine gewisse Schwelle überschreitet, die durch die unvermeidliche Rauschleistung P_N am Empfängereingang gegeben ist. Ein wichtiges Kriterium für die Funktion des Radars ist daher die empfangene Signalleistung P_S, die durch die Radargleichung (z. B. DOVIAK und ZRNIC 1993) gegeben ist. Die gesamte Leistung am Empfängereingang setzt sich somit additiv aus der Signal- und der Rauschleistung zusammen.

Obgleich neuartige Verfahren zur Signalverarbeitung an verschiedenen Institutionen untersucht werden (LEHMANN und TESCHKE 2001), wird das traditionelle Verfahren zur Windbestimmung, das Doppler-Beam-Swinging-Verfahren, das auch bei Sodar-Systemen angewendet wird, nach wie vor überwiegend eingesetzt: Beim DBS-Verfahren werden relativ eng gebündelte Strahlen vertikal und um einen definierten Winkel α gegen den Zenit geneigt in die Atmosphäre (s. Abb. 5-1) gesendet. Aus der Dopplerverschiebung der entsprechenden Rückstreusignale werden in Abhängigkeit von der Laufzeit Profile des Windvektors ermittelt.

Durch Kombination der radialen Geschwindigkeiten, gemessen in mindestens drei (manchmal bis zu fünf) nicht-koplanaren Radarstrahlrichtungen, ist es möglich, den 3D-Windvektor bis in Höhen von 30 km (WPR im VHF-Bereich) zu messen. Die Messungen in

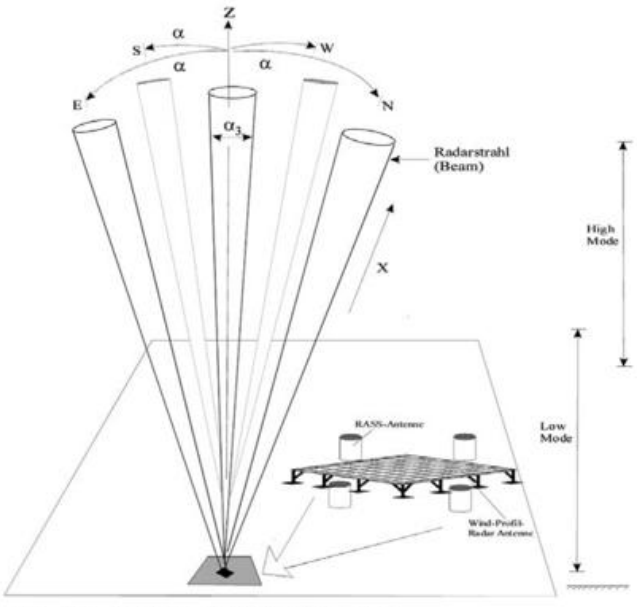


Abb. 5-1: Typische WPR-Konfiguration.

verschiedenen Strahlrichtungen (vertikale Richtung und schräge Richtungen mit einer Zenitdistanz von typischerweise 5° bis 15°) erfolgen dabei zeitlich nacheinander. Als Beispiel geben die folgenden Gln. (1) bis (3), für ein System mit nach Norden und Osten geneigten Strahlen und einem vertikalen Strahl, den Zusammenhang zwischen den gemessenen Radialkomponenten und den Windkomponenten in einem kartesischen Koordinatensystem wieder.

$$v_{r1}(z) = u_1(z)\sin\alpha + w_1(z)\cos\alpha \quad (1)$$

$$v_{r2}(z) = v_2(z)\sin\alpha + w_2(z)\cos\alpha \quad (2)$$

$$v_{r3}(z) = w_3(z) \quad (3)$$

Dabei sind

- v_{r1} die mit dem nach Ost geneigten Strahl gemessene Radialwindkomponente,
- v_{r2} die mit dem nach Nord geneigten Strahl gemessene Radialwindkomponente,
- v_{r3} die mit dem vertikalen Strahl gemessene Radialwindkomponente,
- α Zenitdistanz (Winkel zur Vertikalen),
- u_1 die Westwindkomponente auf dem Oststrahl,
- v_1 die Südwindkomponente auf dem Nordstrahl,
- $w_{1,2,3}$ die Vertikalwindkomponenten auf dem Ost-, Nord- bzw. Vertikalstrahl.

Aus den Gln. (1) bis (3) können nun die horizontalen Windkomponenten u und v gewonnen werden, wenn man voraussetzt, dass das Windfeld im Bereich der horizontalen Abstände zwischen den Strahlen horizontal homogen ist. Dann kann man die Indizes an den kartesischen Komponenten des Windvektors weglassen, und es gilt:

$$u(z) = \frac{v_{rl}(z) - v_{r3}(z)\cos\alpha}{\sin\alpha} \quad (4)$$

$$v(z) = \frac{v_{r2}(z) - v_{r3}(z)\cos\alpha}{\sin\alpha} \quad (5)$$

$$w(z) = v_{r3}(z) \quad (6)$$

Wegen der atmosphärischen Turbulenz ist die oben genannte Homogenitätsannahme genau genommen allenfalls im Mittel erfüllt. DBS-Windmessungen erfordern daher entsprechend lange Mittelungsdauern (10 min bis 1 h). Die vertikale Windkomponente w erfordert jedoch keine Verknüpfung zwischen verschiedenen Streuvolumina und kann daher mit höherer Auflösung (einige Sekunden) gemessen werden.

Qualitativ zeigen die Messungen der beiden WPR-Systeme des MOL auf der Grundlage von langjährigen Vergleichen mit Windmessungen der Routine-Rawinsonden (GÖRSDORF 2000) Genauigkeiten, die diesem aerologischen Standardsystem vergleichbar sind (Abb. 5-2). Ähnliche Ergebnisse bzw. Qualitäten liefert auch der Vergleich der RASS-Temperaturmessungen gegenüber den Radiosondenwerten (GÖRSDORF und LEHMANN 2000), wobei Tab. 5-2 einige Ergebnisse eines Langzeitvergleiches zwischen Radiosondenwerten und WPR- bzw. RASS-Messungen zusammenfasst. Grundsätzlich hat die hohe Qualität der WPR/RASS-Messungen im Zusammenhang mit verschiedenen Assimilationsexperimenten europäischer und außereuropäischer Wetterdienste inzwischen dazu geführt, dass WPR-Systeme erst kürzlich von der WMO als neuer Standard für das globale aerologische Messnetz definiert wurde, der vor allem für hochaufgelöste numerische Modelle als Ergänzungsdatensatz zu dem bestehenden Radiosondennetz eingesetzt wird. Neben der Monitoring- bzw. Referenzaufgabe der MOL-WPR sind die Systeme des MOL so auch Be-

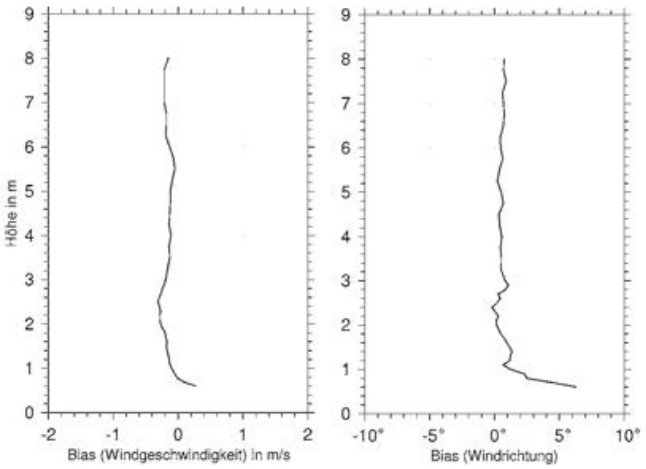


Abb. 5-2: Qualität der WPR-Messungen: Vertikalprofil von mittlerer Abweichung (Bias) halbstündlich gemittelter Windmessungen (links: Windgeschwindigkeit, rechts: Windrichtung) des 482 MHz WPR im Low-Mode gegenüber den 6-stündigen Standard-Rawinsondierungen am Observatorium Lindenberg. Auswertung für den Zeitraum Januar bis Dezember 1997.

	Wind: High Mode		Wind: Low Mode		RASS-Temperatur
Zeitraum	Jan.–Dez.1997		Jan.–Dez.1997		Jan.–Dez.1997
Anzahl der Vergleiche	1089		1127		957
Parameter	Geschwindigk.	Richtung	Geschwindigk.	Richtung	Temperatur (Höhenkorrekt. u. Konst. korrekt.)
Bias in m/s, ° bzw. K	-0,11	0,64	-0,16	0,89	0,11 K
Bias nach Gauß-Fit in m/s bzw. °	-0,27	-0,06	-0,16	0,06	
STD in m/s, ° bzw. K	1,566	9,44	1,349	12,96	0,509 K
STD nach Gauß-Fit in m/s bzw. °	1,289	4,52	1,125	5,88	

Tab. 5-2: Mittlere statistische Parameter des Vergleiches WPR-Rawinsonde für den 482 MHz WPR des MOL (GÖRSDORF 2000).

standteil des DWD-WPR-Messnetzes in Deutschland (4 operationelle Systeme ab Mitte 2005) sowie des europäischen WPR-Messnetzes WINPROF (etwa 15 operation. Systeme), das von EUMETNET koordiniert wird (s. Kap. 8).

Die Verfahrensweise für Sodar erfolgt prinzipiell analog zum Wind-Profil-Radar, jedoch werden hier akustische Wellen als Tracer ausgesandt, deren Dämpfung naturgemäß erheblich stärker ist, was sich in der oben bereits erwähnten deutlich geringeren Reichweite sowie im Zusammenhang mit der geringeren Ausbreitungsgeschwindigkeit des akustischen Signals, in einer deutlich längeren Detektionszeit für das zurückgestreute Signal auswirkt.

Abb. 5-3 zeigt ein Fallbeispiel halbstündlicher 482 MHz WPR-Messungen als Zeit-Höhendarstellung vom 21.11.–22.11.2000 (12:00 UTC). In dieser Darstellung ist die Messung im „Low-Mode" (vertikale Auflösung: 250 m; Höhenmessbereich: 0,5–7,5 km) mit der Messung im „High-Mode" (vertikale Auflösung: 500 m; Höhenmessbereich: 2,6–16 km) kombiniert. Die Wettersituation an diesen Tagen war einerseits durch ein über den Britischen Inseln liegendes Tief und andererseits durch ein ausgeprägtes Hochdruckzentrum im Raum Murmansk/Archangelsk gekennzeichnet, das einen Kerndruck von mehr als 1040 hPa aufwies. Die okkludierenden Fronten des Tiefdruckgebietes kamen zunächst am 21.11. außerordentlich schnell nach Osten voran. In Abb. 5-3 ist der Jet am 21.11.2000, von 12:00 bis 19:00 UTC im Höhenbereich von 6 bis 9,5 km mit einer maximalen Windgeschwindigkeit von etwa 40 m/s in 7 km Höhe und südsüdwestlichen Windrichtungen deutlich zu erkennen. Im Höhenbereich bei 7 km drehte die Windrichtung am 21.11. dann zwischen 19:00 und 22:00 von Südwest auf Nordwest. Mit dem Durchgang eines Höhentroges zwischen 21:00 des 21.11. und 01:00 des 22.11. trat im Höhenbereich um 7 km eine maximale Windgeschwindigkeit von 32 m/s auf.

Nach dem Trogdurchgang drehte der Höhenwind wieder auf südwestliche Windrichtungen zurück und die Windgeschwindigkeit verringerte sich in diesem Höhenbereich auf Werte um 20 m/s. Abb. 5-4 zeigt die zugehörige Zeit-Höhendarstellung der Temperatur (a) und des Wasserdampfes (b) aus halbstündlich gemittelten Messungen mit dem Mikrowellenprofiler des MOL (s. Abschnitt 5) für das betrachtete Fallbeispiel vom 21.–22. 11.2000. Das Eintreffen der okkludierenden Front des Tiefs, am 21.11. gegen 15:00, ist besonders gut an dem Temperaturrückgang in 1 km Höhe zu erkennen. Nachfolgend werden durch die Winddrehung auf Südwest wieder wärmere Luftmassen zugeführt. Eine Zeit-Höhendarstellung des Wasserdampfes (Abb. 5-4 b) zeigt einen im Wesentlichen durch die Advektion bestimmten Verlauf. Mit der Winddrehung von südwestlichen auf westliche Richtungen werden trockenere Luftmassen herangeführt, die am 21.11. bei 1 km Höhe zwischen 12:00 und 24:00 UTC zu einem

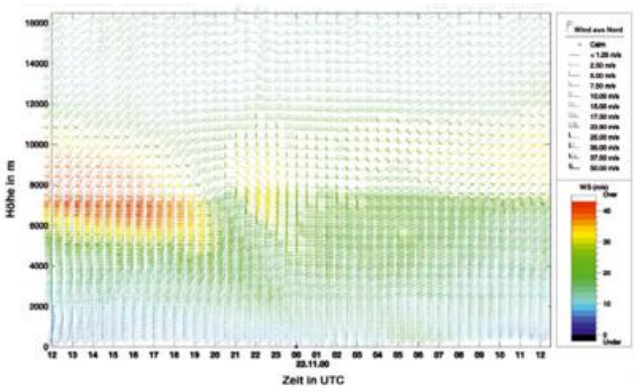


Abb. 5-3: Zeit-Höhendarstellung von halbstündlich gemittelten Windmessungen im Low- und High-Mode des 482 MHz WPR vom 21.11.2000, 12:00 UTC bis 22.11., 12:00 UTC.

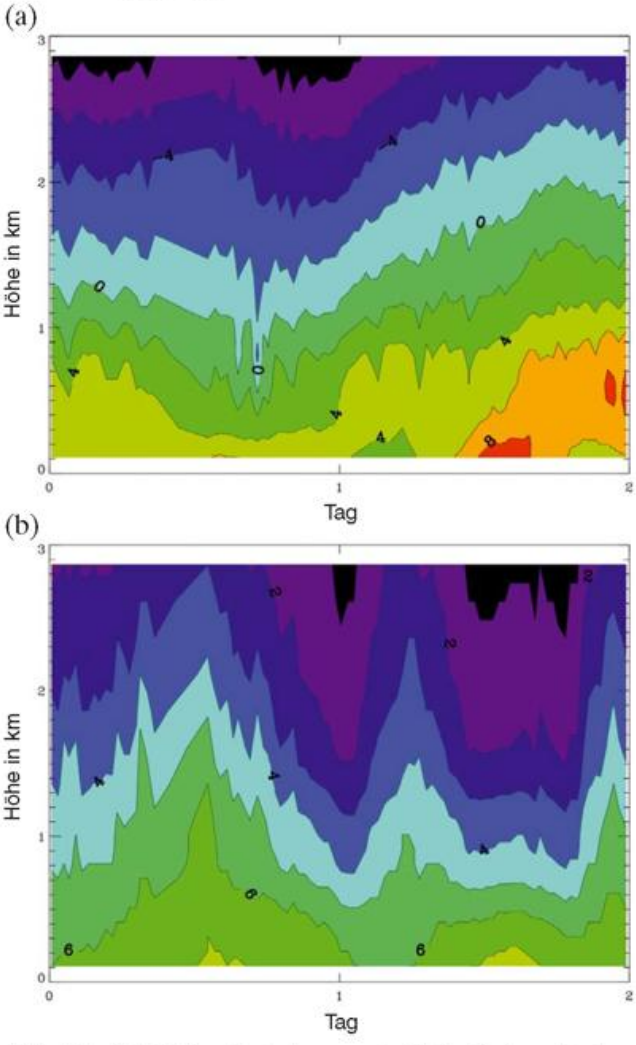


Abb. 5-4: Zeit-Höhendarstellung von halbstündlich gemittelten Messungen des Mikrowellenradiometer-Profilers vom 21.11.2000, 00:00 UTC bis 22.11.2000, 24:00 UTC: Temperatur in °C (a) und Wasserdampfdichte in g/m³ (absolute Feuchte, b).

Abfall der absoluten Feuchte von 6 auf 3 g/m³ führten. Durch die am 22.11. ab 00:00 UTC wiederum aus Südwest herangeführten feuchteren Luftmassen nimmt der Wasserdampfgehalt in Höhen bis zu 3 km dann wieder zu.

Wie in diesem Fallbeispiel demonstriert, können durch halbstündlich gemittelte Messungen mit dem 482 MHz WPR und dem Mikrowellenprofiler (MRP) im Gegensatz zu den Radiosondenmessungen, insbesondere bei hoher atmosphärischer Variabilität, die realen Wind-, Temperatur- und Wasserdampffelder mit hoher zeitlicher Auflösung exakt beschrieben werden. Diese Möglichkeit und die Ergebnisse der mehrjährigen Forschungsarbeiten am MOL bildeten die Grundlage für die Entscheidung des DWD für den Aufbau des ersten europäischen, operationell arbeitenden 482 MHz-WPR-Netzes zwischen 2003 und 2005 (s. Kap. 1).

3 Vertikalsondierung des Wasserdampfes mit Hilfe des Wasserdampf-Raman-Lidars „RAMSES“

Wie Wind-Profil-Radar, Sodar, Wolkenradar und Mikroregenradar ist auch das Lidar (**Li**ght **d**etection **a**nd **r**anging) ein aktives Fernmessverfahren, das heißt, es verwendet eine eigene Strahlungsquelle als Grundlage für die Messung. Im Vergleich zu o. g. Verfahren kann es dabei als optisches Analogon zum Radar betrachtet werden (in älteren Veröffentlichungen findet sich noch die Bezeichnung **Li**cht-Ra**dar** für Lidar). Auch das Lidar wird im Allgemeinen aus einem Sendesystem und einem Empfangssystem gebildet. Der Sender besteht aus einem oder mehreren gepulsten Lasern als Strahlungsquellen. Die Lichtpulse werden über eine Transmitteroptik in die Atmosphäre gesendet. Im Empfänger wird das atmosphärische Rückstreusignal dann mit einem Teleskop gesammelt und anschließend spektral, nach Polarisationszustand oder Intensität zerlegt und schließlich mit Detektoren registriert. Aus der verstrichenen Zeitspanne zwischen Aussenden des Lichtpulses und Auftreten eines Messereignisses kann die Höhe berechnet werden, in der der für das Messereignis zu Grunde liegende Streuprozess stattgefunden hat. Auf diese Weise kann mit dem Lidar direkt ein Vertikalprofil des Wasserdampfes in der Atmosphäre mit hoher räumlicher Auflösung gemessen werden. Ein Nachteil der Fernmessung mit Lidar ist die Winzigkeit der Wirkungsquerschnitte lidarrelevanter Streuprozesse, was im Besonderen für die inelastische (Raman-)Streuung an Molekülen gilt. Ein Lidar sollte deshalb mit möglichst starken Lasern, leistungsfähigem Teleskop und empfindlichem Nachweis ausgestattet sein.

Am Observatorium Lindenberg wird das Raman-Lidar „RAMSES“ („***R**aman-Lidar for **A**tmospheric **M**oisture **S**ensing*“), als eines der Kerninstrumente der Validierungs- und Referenzstation am MOL, im Rahmen des globalen Wasserdampf-Forschungsprojektes (GVaP) der WMO installiert. Unter geeigneten Wetterbedingungen, d. h. sofern keine niederschlagsgebenden tiefen oder optisch dicken Wolken auftreten, wird das Lidar quasi-operationell zunächst nächtliche und in einer Ausbaustufe auch am Tage Vertikalprofile des Wasserdampfes messen, deren qualitative Zuverlässigkeit eine ähnliche Präzision aufweist wie die moderner Radiosonden. Ein Beispiel für die Messgenauigkeit von Wasserdampf-Raman-Lidarmessungen ist in Abb. 5-5 dargestellt. Der Vergleich offenbart die Fähigkeit des Lidar, auch kleinskalige Strukturen des Wasserdampfprofils wiederzugeben, die von passiven Systemen, wie einem Mikrowellenprofiler methodisch bedingt nicht erfasst werden können. Der Vorteil des Mikrowellenprofilers besteht allerdings darin, dass auch in der mit optisch dicken Wolken bedeckten Atmosphäre gemessen werden kann. Eine allgemeine Einführung in die Grundlagen der Lidar-Fernerkundung findet man z. B. bei MEASURES (1992).

Die grundlegende Theorie des Raman Lidars (z. B. COONEY 1970, TURNER und WHITEMAN 2002) zur Messung des Wasserdampfes ist unkompliziert: Das Wasserdampf-Mischungsverhältnis $m(z)$ ist definiert als das Verhältnis der Masse des Wasserdampfes zur Masse trockener Luft und wird zumeist in g/kg angegeben. Da Stickstoff in der Troposphäre höhenunabhängig in einem konstanten Mischungsverhältnis existiert, ist somit auch die Masse an Stickstoff pro Kilogramm trockener Luft höhenunabhängig. Damit ist $m(z)$ in der Troposphäre proportional dem Massenverhältnis von Wasserdampf zu Stickstoff, das wiederum proportional zur Anzahldichte der Wasserdampfmoleküle, $n_{wv}(z)$, dividiert durch die Anzahldichte der Stickstoffmoleküle, $n_N(z)$ ist, so dass gilt

$$m(z) \propto \frac{n_{wv}(z)}{n_N(z)} \qquad (7)$$

Bei der Raman-Streuung wird die emittierte Laser-Wellenlänge λ_0, abhängig vom streuenden Molekül, auf die Wellenlänge λ verschoben, so dass das Rückstreu-

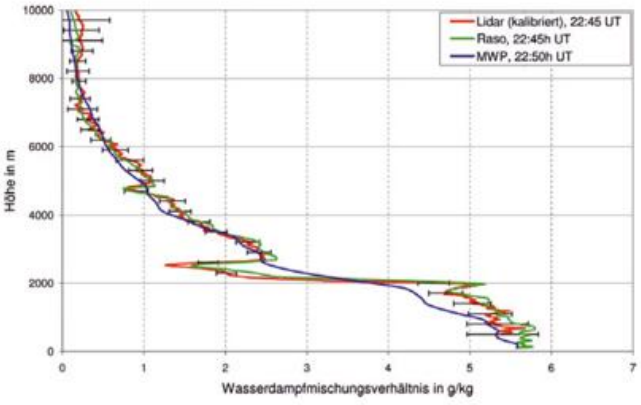


Abb. 5-5: Beispiel einer Messung des Vertikalprofils des Wasserdampf-Mischungsverhältnisses mit Hilfe eines Raman-Lidar. Die Messung wurde am 06.09.2003 um 22:45 UTC mit dem System MARL des Alfred-Wegener-Instituts für Polar- und Meeresforschung am Observatorium Lindenberg des DWD gewonnen und zeigt neben einer Information über den statistischen Fehler der Lidarmessung auch den Vergleich zu den zeitgleichen Messungen des Mikrowellenprofilers (MWP) sowie der Routine-Radiosonde (Raso) am MOL. Das Vertikalprofil bezieht sich auf den 00 UTC Radiosondentermin (Start um 22:50 UTC).

signal aus der Atmosphäre in Abhängigkeit von der Höhe z (bzw. Entfernung) ausgedrückt werden kann als

$$S_\lambda(z) = I_0 \frac{k_\lambda}{z^2} O_\lambda(z)\sigma(z)n_\lambda(z)q(\lambda_0,z)q(\lambda,z) \quad (8)$$

Die einzelnen Symbole sind dabei wie folgt definiert:

- I_0 Laser-Sendepulseenergie,
- k_λ skalarer Faktor zur Berücksichtigung von Detektor-Empfindlichkeit und Teleskop-Empfangsfläche,
- $O_\lambda(z)$ Überlappungsfunktion zwischen Laser-Sendestrahl und Empfängergesichtsfeld (getrennt für jeden Empfangskanal),
- $\sigma(z)$ Raman-Rückstreuquerschnitt,
- $n_\lambda(z)$ Anzahldichte der jeweils interessierenden Moleküle,
- $q(\lambda_0,z)$ Transmission des ausgesandten Lasersignals,
- $q(\lambda,z)$ Transmission des empfangenen Lasersignals.

Wird nun das Verhältnis der Rückstreusignale von Wasserdampf sowie Stickstoff gebildet, so entfallen eine Reihe von Termen in Gl. (8) und es ergibt sich

$$\frac{S_{wv}(z)}{S_N(z)} = k \cdot O(z)\left(\frac{n_{wv}(z)q(\lambda_{wv},z)}{n_N(z)q(\lambda_N,z)}\right) \quad (9)$$

In dieser Gleichung beschreibt $O(z)$ eine differentielle Überlappungsfunktion, die durch $O_w(z)/O_N(z)$ gegeben ist, während k eine Zusammenfassung verschiedener Konstanten aus Gl. (8) enthält. Da die Raman-Rückstreuquerschnitte $\sigma_{wv}(z)$ sowie $\sigma_N(z)$ bei allen troposphärischen Temperaturen und für nicht zu schmalbandige Empfangsfilter als konstant betrachtet werden können, sind diese Größen ebenfalls in k enthalten. Das resultierende Verhältnis ist nach der Berücksichtigung des differentiellen Transmissionsfaktors $q(\lambda_w,z)/q(\lambda_N,z)$ sowie $O(z)$, proportional zum Wasserdampfmischungsverhältnis $m(z)$.

Hochpräzise Messungen des Wasserdampfes sind durch die schwer messbaren Proportionalitätsfaktoren in Gl. (9) mit dem Raman-Lidar nicht möglich. Prinzipiell ist eine Kalibrierung der Wasserdampfmessung eines Raman-Lidars dennoch über die experimentelle Bestimmung dieser Faktoren denkbar. In der Praxis werden jedoch zumeist andere Verfahren angewendet. Zu diesen alternativen Verfahren der Verhältnismessung zählt die Kalibrierung mittels eines Radiosondenaufstiegs oder auch mit Hilfe der Messung des Wasserdampfsäulengehaltes eines Mikrowellenradiometers. Erst nach dieser Kalibrierung lassen sich schließlich hochaufgelöste Zeitreihen des Feuchteprofils über dem Observatorium aufnehmen.

Eine Besonderheit des Systems RAMSES am Observatorium Lindenberg stellt die Verwendung von zwei Empfängern mit unterschiedlich großen Teleskopen für den Nahbereich und für den Fernbereich dar. Mit diesem Systemaufbau wird eine optimierte Messung des Wasserdampfprofils von Bodennähe bis zur Tropopause erreicht. Der von RAMSES verwendete Laser sendet augensicher im Bereich der UV-A-Strahlung (355 nm Wellenlänge). Die Empfangssignale unterliegen dadurch jedoch dem Einfluss der Sonnenstrahlung, der sich störend auf die Reichweite der Feuchtemessung am Tage auswirkt. Eine Realisierung von Tagesmessungen des Wasserdampfprofils mit RAMSES ist daher erst in einem zweiten Realisierungsschritt geplant, so dass das System seine operationelle Einsatz- und Leistungsfähigkeit zunächst mit reinen Nachtmessungen nachweisen wird. Neben dem Wasserdampf werden jedoch bereits in 2005 auch optische und geometrische Eigenschaften von Wolken, als Ergänzung zur Erfassung mit Hilfe des Wolkenradars, zu den Studienobjekten gehören.

Wie auch bei den anderen Fernmesssystemen des Observatoriums wurde bei der Konzeption von RAMSES darauf geachtet, dass das Instrument autonom messen kann. Ein wichtiger Bestandteil der Messüberwachung stellt dabei die zuverlässige Beobachtung der atmosphärischen Situation (u. a. mit Hilfe eines Laser-Ceilometers) dar, muss doch gegebenenfalls eine Messung sofort unterbrochen und das Teleskopdach geschlossen werden können, sollte Niederschlag die empfindlichen optischen Komponenten des Lidars bedrohen. RAMSES wird am Observatorium Lindenberg ab dem Sommer 2005 in das Monitoringprogramm des Observatoriums integriert und in einem klimatisierten Container, auf der Ostseite der Strahlungszentrale installiert.

4 Vertikalsondierung mikro- und makrophysikalischer Wolkenparameter mit Hilfe des Wolkenradar „MIRA-36“

Das Wolkenradar des Observatoriums ist ein weiteres Kerninstrument der WMO GVaP-Referenzstation am MOL. Dieses kohärente 35,5 GHz-Radar sendet und empfängt gepulste Radarsignale in zwei Polarisationsebenen. Sein vertikaler Messbereich (s. Tab. 5-3) zur Erfassung von Vertikalprofilen der Reflektivität, der Dopplergeschwindigkeit und der Geschwindigkeitsvarianz umfasst die gesamte Troposphäre und untere Stratosphäre in einem Höhenbereich zwischen 150 m und 15 km. Aus den primären Messgrößen können sowohl makroskopische Wolkenparameter wie Unter- und Obergrenzen abgeleitet, als auch – zumindest indirekt und näherungsweise – mikrophysikalische Größen wie Tropfengrößen-Verteilungen, Flüssig- und Eiswassergehalt abgeleitet werden.

Das von der Fa. Metek/Elmshorn in Kooperation mit dem Institut für Radioastronomie in Kharkov hergestellte System wurde vom DWD für den kontinuierlichen Messbetrieb konzipiert und im November 2003 am Meteorologischen Observatorium Lindenberg in Betrieb genommen. Zu den Hauptkomponenten des Radars zählen die Antenne, zwei Sender, zwei Emp-

Frequenz	35,5 GHz
Spitzenleistung	30 kW
Sendertyp	Magnetron
Antennentyp	Cassegrain mit Polarisationsfilter
Antennendurchmesser	1 m
Antennengewinn	49 dB
Strahlbreite	0,55°
Polarisationstrennung	–35 dBi
Pulslänge	100, 200 und 400 ns
Vertikale Auflösung	15, 30 und 60 m
Pulsfolgefrequenz	2,5; 5 und 7,5 kHz
Anzahl der FFT-Punkte	128, 256, 512 und 1024
Minimale Messhöhe	150 m
Maximale Messhöhe	15 km
Mittelungszeit	0,1–60 s
Maximale Empfindlichkeit in 5 km	–50 dBZ

Tab. 5-3: Ausgewählte technische Parameter des Wolkenradars MIRA-36.

fänger, der Radarcomputer, ein Controller, eine Kalibrierungseinheit und die Stromversorgung. Mit Ausnahme der Antenne sind die Komponenten in einem Kofferanhänger installiert. Die Antenne ist fest auf dem Dach befestigt und sendet in exakt vertikaler Richtung ihre gepulsten Signale. Wesentliche Grundlagen zur Radartechnik und eine allgemeine Einführung sind auch für das Wolkenradar in dem Lehrbuch von DOVIAK und ZRNIC (1993) zu finden.

Wichtige technische Charakteristika des Wolkenradars am MOL sind in Tab. 5-3 zusammengefasst. Im Monitoringbetrieb wird das Radar am Observatorium mit einer Pulslänge von 200 ns (entspr. 30 m vertikaler Auflösung), 256 FFT-Punkten, 200 spektralen Mittelungen (entspr. 10 s Mittelungszeit) und 420 Höhenstufen, mit einer minimalen und maximalen Messhöhe von 240 m bzw. 12840 m betrieben. Die Pulswiederholfrequenz beträgt 5 kHz (entspr. 200 µs Pulswiederholperiode). Daraus resultieren eine spektrale Auflösung von 0,08 m/s und ein Eindeutigkeitsbereich der Dopplergeschwindigkeit von 10,24 m/s. Alle Momente der Dopplerspektren werden für die einzelnen Höhenstufen getrennt gespeichert. Darüber hinaus können für jede Höhenstufe die Leistungsspektren aufgezeichnet werden, um beispielsweise Tropfengrößenverteilungen, die Tropfenfallgeschwindigkeit und den Vertikalwind abzuschätzen. Außerdem kann zwischen monomodalen und multi-modalen Spektren unterschieden werden, die ebenfalls Rückschlüsse auf die Tropfenverteilung zulassen.

Analog zum Wind-Profil-Radar oder auch zum Lidarverfahren sendet auch das Wolkenradar elektromagnetische Impulse (senkrecht) in die Atmosphäre, die hier jedoch an Wolken- und Niederschlagströpfchen bzw. -eisteilchen (allgemein als Hydrometeore bezeichnet), aber auch an anderen Partikeln wie Insekten oder Staubteilchen gestreut werden. Die zurückgestreuten und mit dem Radar empfangenen Signale werden hinsichtlich Amplitude und Phase ausgewertet, woraus sich die Reflektivität, die proportional zur Anzahl und Größe der Hydrometeore ist, und deren Bewegung ableiten lässt.

Die Signalverarbeitung für die Streusignale umfasst dann im Einzelnen die folgenden Stufen:

- Berechnung des Leistungsspektrums des demodulierten Empfangssignals mittels Fourier-Transformation,
- nicht-kohärente Integration der Spektren (spektrale Mittelung),
- Bestimmung der drei Momente des detektierten Signals (SNR, Dopplergeschwindigkeit, Geschwindigkeitsvarianz) und
- Berechnung des effektiven Radar-Reflektivitätsfaktors Z_e aus SNR.

Die Bestimmung des Rauschniveaus beim Wolkenradar kann nach zwei Verfahren erfolgen. Entweder wird das Signal aus einer Höhe, aus der kein meteorologisches Signal zu erwarten ist, als Rauschen angenommen oder aber das Rauschen wird aus dem Leistungsspektrum statistisch abgeleitet (HILDEBRANDT und SEKHON 1974). Durch kontinuierliche Messung der Sendeleistung und der Empfängerempfindlichkeit (Verwendung einer Rauschdiode) wird am Wolkenradar eine dynamische Kalibrierung des Systems realisiert. Die Antenne verfügt darüber hinaus über ein Polarisationsfilter und erlaubt damit die Trennung von ko- und kreuzpolarisierten Signalkomponenten, wobei das Verhältnis aus ko- und kreuzpolarisiertem Signal, das als „Lineares Depolarisationsverhältnis“ (LDR) bezeichnet wird, Rückschlüsse über die geometrische Form der Hydrometeore zulässt.

Als Beispiel für die Möglichkeiten zur Erfassung von Wolkenparametern mit dem Wolkenradar am MOL zeigen die Abb. 5-6 und 5-7 Zeit-Höhen-Schnitte der drei Momente des Dopplerspektrums und des Linearen Depolarisationsverhältnisses [LDR] (Abb. 5-6 unten) für den 04.01.2005. An diesem Tag befand sich das Observatorium Lindenberg im Bereich einer über Mitteleuropa verlaufenden Frontalzone, wobei in der ersten Nachthälfte eine Warmfront den Osten Deutschlands überquerte und die Zufuhr milder und feuchter Atlantikluft aufrechterhielt. Im Bereich der Warmfront regnete es bis etwa 8:30 UTC, vor allem anfangs ununterbrochen und mit mäßiger Intensität. Die Messungen des Wolkenradars zeigen in Verbindung mit dem Regen kompakte Bewölkung, die sich von Höhen unterhalb der minimalen Messhöhe des Radars (240 m) bis in etwa 8 km erstreckt. Der Niederschlag ist dabei durch hohe Reflektivitäten (Abb. 5-6 oben) und große Beträge der Dopplergeschwindigkeit (Abb. 5-7 oben) von mehr als 5 m/s (negativ = abwärts, d. h. zum Radar gerichtet) gekennzeichnet. Deutlich tritt ferner in 750 m Höhe das Schmelzband, das häufig auch mit dem englischen Ausdruck „bright band“ bezeichnet wird, im Bereich der Nullgradgrenze durch

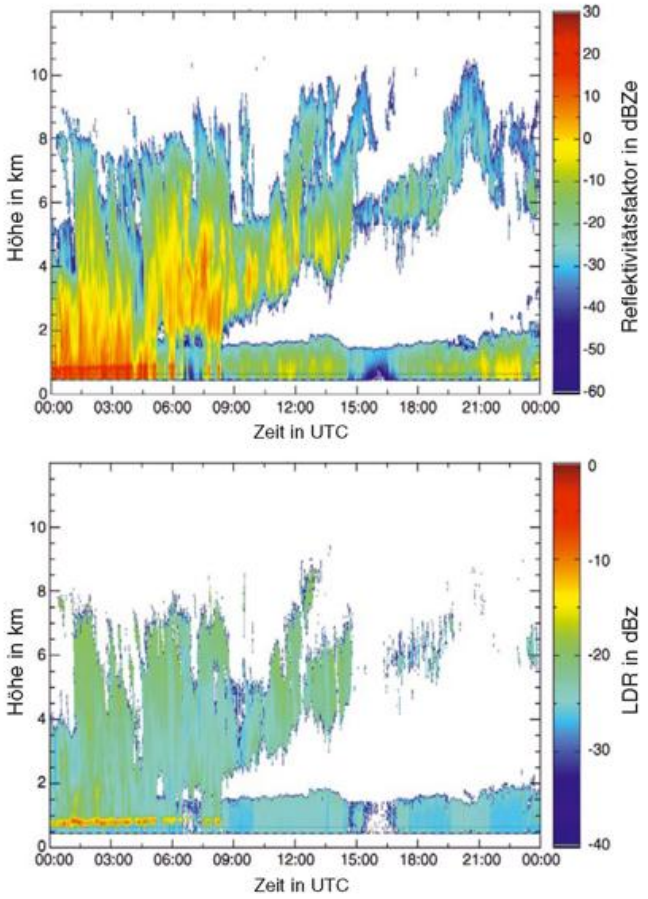


Abb. 5-6: Zeit-Höhen-Schnitt des Reflektivitätsfaktors (0. Moment, oben) und des Linearen Depolarisationsverhältnisses [LDR] (unten) aus Messungen des Wolkenradars MIRA-36 am 04.01.2005.

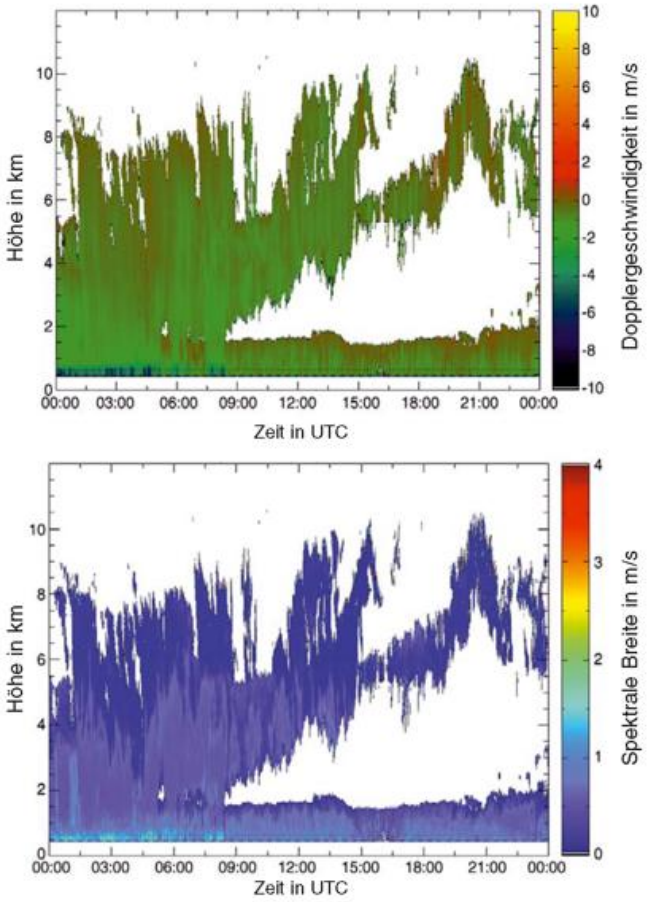


Abb. 5-7: Zeit-Höhen-Schnitt (oben) der Vertikalgeschwindigkeit (1. Moment) und (unten) der Geschwindigkeitsvarianz (2. Moment) aus Messungen des Wolkenradars MIRA-36 am 04.01.2005. In Abb. 5-7 oben beschreiben rote Farbtöne aufwärts gerichtete und grüne bzw. blaue Farbtöne abwärts gerichtete Vertikalbewegungen.

höhere Reflektivitäten und größere Werte des LDR (Abb. 5-6, unten) hervor. Nach dem Abzug der Front entwickelten sich aus der kompakten Bewölkung zwei Wolkenschichten. Die tiefere Wolkenschicht (Obergrenze 1,5–2 km) blieb bis zum Tagesende nahezu unverändert, während darüber ein Übergang von mittelhohen zu hohen Wolken erfolgte.

5 Allwetter-Fernerkundung mit Hilfe passiver Mikrowellenradiometrie

Mikrowelleninstrumente wie das Mikrowellen-Radiometer und der Mikrowellen-Profiler des MOL haben sich für Monitoringprogramme der Atmosphäre als unverzichtbare Informationsquellen erwiesen, da sie automatisch betrieben werden und Messergebnisse auch bei Bewölkung sowie unabhängig von der Tageszeit, also Tag und Nacht, bereitstellen können. Lediglich bei Regen können die Messungen gestört oder fehlerhaft sein. Wesentliche Grundlagen zur Fernerkundung mit Hilfe von Mikrowellen bzw. einen allgemeine Einführung sind z. B. bei ULABY et al. (1981) und JANSSEN (1993) zu finden.

Das Mikrowellen-Radiometer des Observatoriums ist bereits seit 1995 im operationellen Einsatz. Aus seinen Messungen kann der Gesamtwasserdampf- und der Gesamtflüssigwassergehalt mit hoher zeitlicher Auflösung berechnet werden. Der Mikrowellen-Profiler am Observatorium Lindenberg (Abb. 1-39) war zum Zeitpunkt seiner Aufstellung im Jahr 1998 weltweit das erste Gerät dieser Art, das für einen operationellen Einsatz erprobt wurde. Aus den Messungen des Profilers können Vertikalprofile der Temperatur, des Wasserdampfes und des Flüssigwassergehaltes berechnet werden (SOLHEIM et al. 1998). Die technischen Merkmale beider Instrumente sind in Tab. 5-4 beschrieben. Passive Mikrowelleninstrumente messen die thermische Emission der Atmosphäre in ausgewählten Spektralintervallen. Diese Systeme nutzen die Wechselwirkung der Mikrowellenstrahlung mit Bestandteilen der Atmosphäre aus, wobei die Art und Weise dieser Wechselwirkung vom Absorber sowie von der Wellenlänge (bzw. Frequenz) abhängig ist und durch die (Wärme-)Strahlungstransportgleichung beschrieben wird.

Wasserdampf besitzt eine Absorptionslinie bei 22,235 GHz. Weiterhin liegt bei 60 GHz eine Sauerstoffabsorptionsbande. Bei der Wasserdampfbestim-

Mikrowellen-Radiometer			Mikrowellen-Profiler	
Radiometrics Corporation		*Hersteller*	Radiometrics Corporation	
November 1995		in Betrieb seit	November 1998	
23,8 GHz	31,4 GHz	Messfrequenzen	Wasserdampf-bestimmung 22,23; 23,03; 23,83; 26,23; 30,00 GHz	Temperatur-bestimmung 51,25; 52,28; 53,85; 54,94; 56,66; 57,29; 58,80 GHz
5,5°	4,6°	Öffnungswinkel	5°–6°	2°–3°
‚tipping-curve'		System-Kalibrierung	‚tipping-curve'	mit flüssigem Stickstoff
52 x 28 x 76 cm		Abmaße	52 x 28 x 76 cm	
< 40 kg		Gewicht	< 40 kg	
etwa 40 s		Zeitliche Auflösung	etwa 1–7 min	
		Zusatzinformation	IR-Pyrometer (~10 µm) zur Messung der effektiven Strahlungstemperatur im Gesichtsfeld des MW-Profilers (Flüssigwasser, Wolken) Bodenwerte (Temperatur, Druck, relative Feuchte)	
Integrierter Wasserdampfgehalt Integrierter Flüssigwassergehalt		Ergebnisse	Temperaturprofil (0–10 km) Wasserdampfprofil (0–10 km) Vertikale Struktur des Flüssigwassergehaltes (0–10 km)	

Tab. 5-4: Ausgewählte Merkmale der Mikrowelleninstrumente.

mung wird nun der Umstand ausgenutzt, dass in der Nähe des Linienzentrums eine andere Abhängigkeit zum Wasserdampfgehalt besteht als an den Flügeln der Absorptionslinie. So ist z. B. beim Zweikanal-Radiometer der 23,8 GHz-Kanal dreimal so empfindlich gegenüber Wasserdampf, wie der bei 31,4 GHz.

Zur Bestimmung des Temperaturprofils wird andererseits in Bereichen gemessen, in denen der Absorber ein konstantes Mischungsverhältnis besitzt (CO_2 oder O_2). Die mit dem Profiler gemessene Mikrowellenstrahlung ist damit nicht vom Absorbergehalt, sondern nur von der Temperatur abhängig. Die unterschiedlichen Absorptionseigenschaften in den einzelnen Messkanälen bewirken, dass die am Boden gemessene Strahlung aus unterschiedlichen Höhen stammt (andere Verteilung der sogen. Gewichtsfunktion). Dieser Zusammenhang wird durch die Transmissionsfunktion beschrieben. Die Kenntnis dieser Funktion ermöglicht eine näherungsweise Bestimmung der Temperatur- bzw. Feuchteprofile.

Das mathematische Problem, dass man für die Berechnung der vertikalen Temperatur- und Feuchteprofile lösen muss, ist unterbestimmt. Das heißt für die Strahlungstransportgleichung

$$y = Ax + \varepsilon \qquad (10)$$

wobei mit x der Vektor der Temperatur- bzw. Feuchteprofile, mit y die gemessenen Strahldichtewerte in den unterschiedlichen Spektralintervallen und mit ε die dazugehörigen Messfehler bezeichnet sind, dass es mehr Unbekannte (Profil mit n Höhenstufen) als Messungen (Strahldichte in m Spektralintervallen) gibt. Zusätzlich zum Strahlungstransportoperator A ist also die Einbeziehung weiterer statistischer Informationen wie z. B. der Kovarianzmatrix K der Temperatur- bzw. Feuchteprofile und der Kovarianzmatrix S des Messfehlers, erforderlich. Weiterhin werden noch die Temperatur und Feuchte am Profilerstandort sowie die Infrarottemperatur in Messrichtung, zur Bestimmung der Flüssigwasserprofile einbezogen. Die Lösung dieser Minimierungsaufgabe ist dann eindeutig und hat folgendes Aussehen:

$$x_e = KA^T(AKA^T + S)^{-1} y \qquad (11)$$

Neben der beschriebenen deterministischen Vorgehensweise gibt es weitere Methoden, die am Meteorologischen Observatorium Lindenberg regelmäßig analysiert und bewertet werden. So kann z. B. ein „neuronales Netz" entwickelt werden, also ein lernendes System, dass repräsentative Temperatur- und Feuchteprofile (und auch modellierte Flüssigwasserprofile) aus Radiosondenmessungen sowie daraus berechnete Strahldichtewerte als Trainingsdatensatz angeboten bekommt. Die dabei ermittelten Koeffizienten enthalten dann indirekt die Zusammenhänge, die durch die Strahlungstransportgleichung beschrieben werden.

Ein weiteres Lösungsverfahren ist die statistische Regression (GÜLDNER und SPÄNKUCH 2001). Diese Methode basiert darauf, dass die Temperatur- und Feuchteprofile aus Radiosondenmessungen (x) direkt den dazugehörigen Messwerten des Mikrowellenprofilers (y) gegenübergestellt werden. Die Methode berücksichtigt also reale und gleichzeitig durchgeführte Beobachtungen. In Analogie zu Gl. (11) ergibt sich nach Berechnung der Kovarianzmatrizen C_{xy} und C_{yy}:

$$x_e = C_{xy}\, C_{yy}^{-1}\, y \qquad (12)$$

Der Vorteil des statistischen Verfahrens besteht darin, dass sie flexibel (z. B. für die vier Jahreszeiten) berechnet werden können und keine Kenntnisse über den Strahlungstransport erforderlich sind. Demzufolge können sich vorhandene Fehler im Strahlungstransportmodell nicht negativ auf die Lösung der oben beschriebenen inversen Aufgabe oder auch auf das Ergebnis des neuronalen Netzes auswirken. Die Methode setzt jedoch eine umfangreiche Qualitätsprüfung der Daten voraus, die bei der Erstellung des Regressionsoperators nach Gl. (12) einbezogen werden. Fehlerhafte Datensätze verfälschen den physikalischen Zusammenhang bzw. verschmieren ihn. Das ist gleichbedeutend mit einer Verschlechterung des ohnehin schon niedrigen vertikalen Auflösungsvermögens. Da das MOL zur Zeit noch über die umfangreichste Sammlung von Parallelmessungen dieser Art verfügt, ist die-

ses Observatorium die weltweit einzige Station, die zur Auswertung bodengebundener Mikrowellenmessungen das statistische Verfahren anwendet und kontinuierlich eine Bewertung durchführt.

Ein Beispiel für die Ergebnisse einer statistischen Bewertung werden in den beiden Abb. 5-8 gezeigt. Dargestellt sind neben der Standardabweichung der Radiosondenprofile von Temperatur und absoluter Feuchte ‚STD(RS)' die systematischen Abweichungen und der rms-Fehler für das neuronale Netz ‚NN' und zwei unterschiedliche Regressionsverfahren ‚REG_{old}' und ‚REG_{new}'. Deutlich sichtbar sind die Überschätzungen von Temperatur und Feuchte bei Anwendung des neuronalen Netzes, die auf unzureichende Kenntnisse bei der Modellierung des Strahlungstransports und der daraus resultierenden fehlerhaften Belernung des Systems zurückzuführen sind.

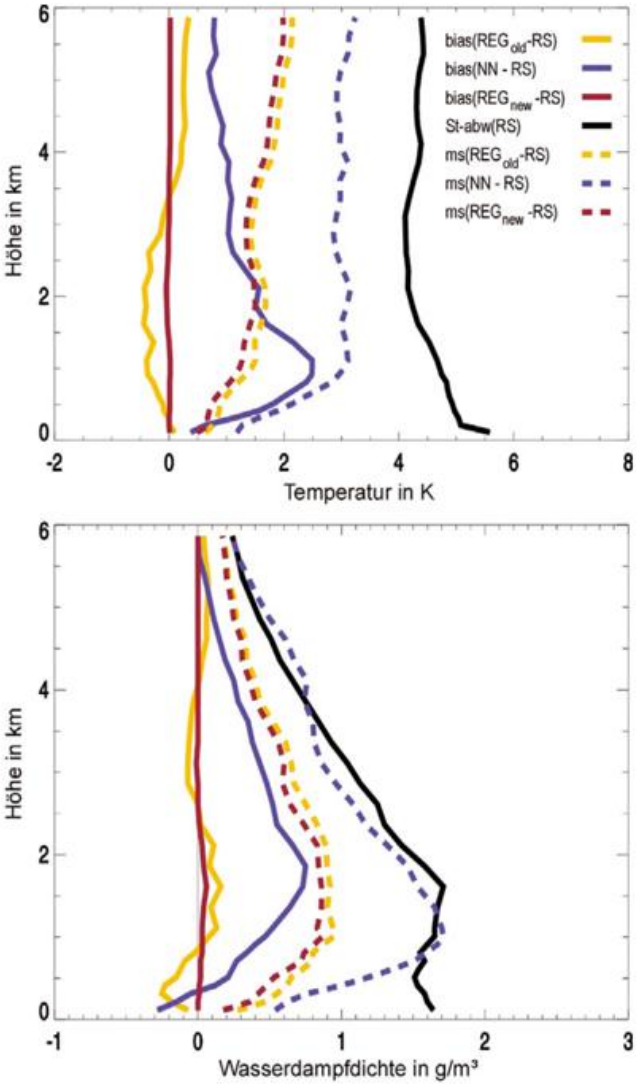


Abb. 5-8: Genauigkeitsbewertung von Algorithmen zur Bestimmung von Vertikalprofilen der Temperatur in K (oben) sowie der absoluten Feuchte (Wasserdampfdichte) in g/m³ (unten) auf der Grundlage von Messungen des Mikrowellenprofilers für den Zeitraum 01.09.–30.11.2003.

Als Beispiel für Vertikalsondierungen von Temperatur und Feuchte zeigt Abb. 5-9 Zeit-Höhenschnitte dieser Parameter aus Zeitserien von Temperatur- und Feuchteprofilen des Mikrowellenprofilers zwischen dem 9. und 11.02.2001. Die farbigen Pfeile markieren die Startzeiten von Radiosonden. In der dargestellten 3-Tages-Periode passierte eine Kaltfront mit trockenen Luftmassen Lindenberg. Eine Temperaturinversion von mehr als 6 °C in einer Höhe von etwa 500 m zu Beginn der Periode löste sich auf und die anschließende generelle Abkühlung setzte sich den ganzen Tag fort. Gegen 12 UTC des zweiten Tages erwärmte sich die Atmosphäre, wobei der Temperaturanstieg bis zum Nachmittag des dritten Tages anhielt. Bei der Feuchte wurden relativ hohe Werte am ersten Tag gemessen, die am Ende des Tages deutlich abfallen. Am frühen Morgen des dritten Tages stieg dann die Feuchte wieder deutlich an und erreichte ihr Maximum gegen Mittag mit Werten von etwa 6 g/m³ in etwa 1 km Höhe. Das Beispiel zeigt, dass Mikrowellenmessungen ein zeitlich hoch aufgelöstes Monitoring von Vertikalprofilen ermöglichen, insbesondere in den Höhenschichten bis zu 3 km. Die Qualität der Ergebnisse kann dabei über den Vergleich der Mikrowellenprofilermessungen mit Radiosondenprofilen belegt werden, die in Abb. 5-10 für den entsprechenden Zeitraum gezeigt sind. Die Radiosondenprofile für diesen Vergleich liegen dabei mit einer zeitlichen Auflösung von sechs Stunden vor.

Da auch Wolkentropfen Mikrowellenstrahlung emittieren, ist durch Lösung der inversen Aufgabe auch der atmosphärische Flüssigwassergehalt ableitbar. Durch zusätzliche Informationen, beim Mikrowellenprofiler am Observatorium durch Einbeziehung der IR-Pyrometer-Messungen, lässt sich eine Wolkenhöhe abschät-

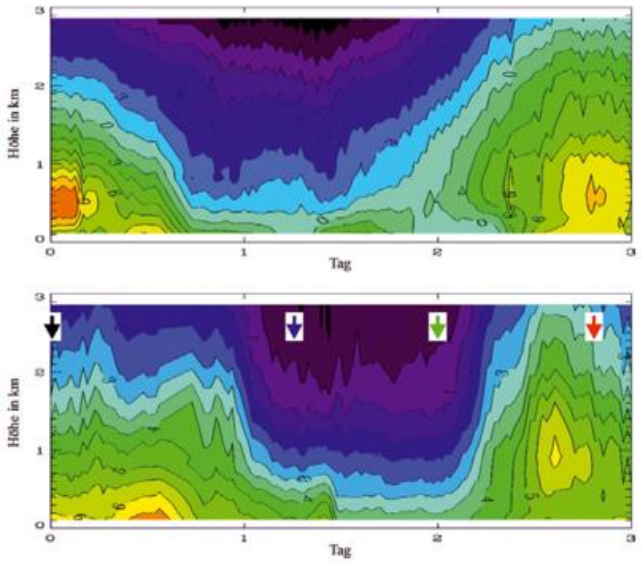


Abb. 5-9: Zeit-Höhenschnitt von Temperatur in °C (oben) und Wasserdampfdichte in g/m³ (unten) des Mikrowellen-Profilers für den 09.–11.02.2001 in Lindenberg. Pfeile markieren die Starttermine der Vergleichsradiosonden (s. Abb. 5-10).

zen und auf diese Weise eine dementsprechende vertikale Zuordnung des Flüssigwassergehalts vornehmen. Zur Realisierung der Bestimmung wird wiederum ein neuronales Netz verwendet, das zur Erzeugung eines

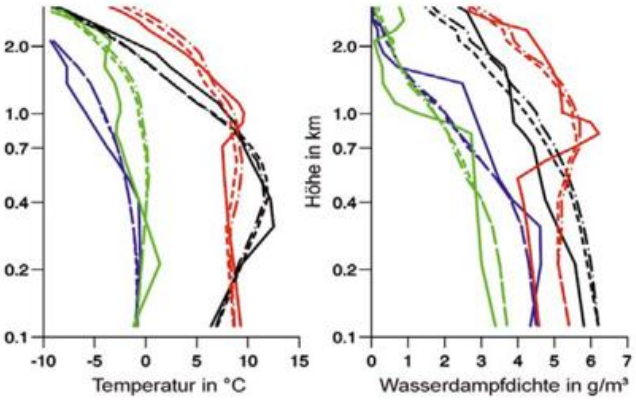


Abb. 5-10: Vergleich von Radiosondenprofilen sowie Mikrowellenmessungen für den Zeitraum 9.–11.02.2001 (s. Abb. 5-9): Für jeden Radiosonderstarttermin sind jeweils zwei aufeinander folgende Mikrowellen-Vertikalprofile der Temperatur (links) und des Wasserdampfes (rechts) dargestellt.

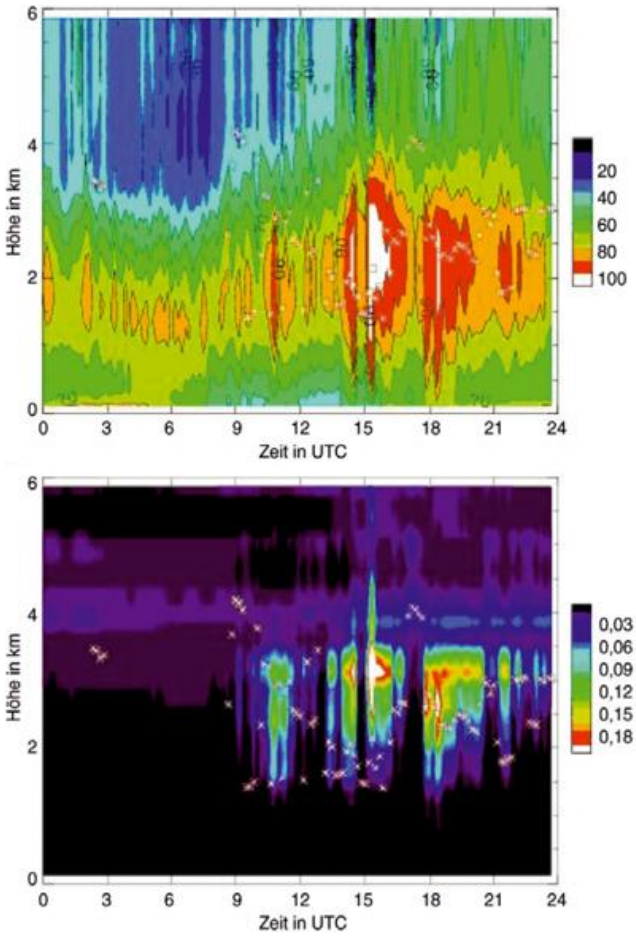


Abb. 5-11: Relative Feuchte in %, berechnet aus Temperatur- und Feuchteprofilen des Mikrowellenprofilers (oben) und vertikaler Flüssigwassergehalt in g/kg (unten) für den 22.06.2004. Die Markierungen (*) kennzeichnen die unabhängig mit einem Laser-Ceilometer gemessenen Wolkenuntergrenzen.

Trainingsdatensatzes neben dem Strahlungstransportmodell auch ein ‚Wolkenmodell' benötigt, um den Radiosondenmessungen physikalisch sinnvolle Flüssigwasserprofile zuzuordnen. Zur Bestimmung des Wolken-Flüssigwassergehaltes zeigt Abb. 5-11 ein Beispiel, wobei hier der Tagesverlauf des Flüssigwassergehalts am 22.06.2004 dargestellt ist. Zum besseren Verständnis sind in dieser Abbildung auch die Wolkenuntergrenzen eingetragen, die unabhängig vom Mikrowellenprofiler mit einem der Laser-Ceilometer des Observatoriums gemessen, bei der Berechnung jedoch nicht verwendet wurden.

6 Fernerkundung von Wasserdampf- und Temperaturprofilen mit Hilfe von FTIR-Spektroskopie

Wie bereits Wasserdampf-Lidar, Mikrowellenprofiler und Wolkenradar gehört auch das **F**ourier-**T**ransformations-**I**nfrarot-Spektrometer (FTIR) „*EISAR*" des Observatoriums zu den Standardsystemen der WMO/GVaP-Referenzstation am MOL (s. Abb. 1-49). Das EISAR („***E**nhanced **I**nfrared **S**pectrometer for **A**tmospheric **R**esearch*") bezeichnet eine Sonderanfertigung der Firma Bruker Optics, die vor seiner Überführung zum MOL am Meteorologischen Observatorium Potsdam für wissenschaftliche Anwendungen konzipiert und vorbereitet wurde (SPÄNKUCH et al. 1996). Bei der Entwicklung dieses Gerätes wurde ebenfalls besonders auf die Allwettertauglichkeit, die Zuverlässigkeit des automatisierten Betriebs sowie die Flexibilität in der Anwendung geachtet. EISAR besteht aus dem in einem klimatisierten Gehäuse untergebrachten Spektrometer auf der Messplattform der Strahlungszentrale und der über Leitungen verbundenen Rechen- und Versorgungstechnik im tiefer gelegenen Gebäudestockwerk.

Das Spektrometer ist eine Variante des Bruker-Spektrometer IFS-55, das nach dem Prinzip eines Michelson-Interferometers arbeitet. Hierbei wird das Licht der Atmosphäre durch einen Strahlteiler in zwei Teilstrahlen aufgespaltet, die, nachdem der eine über einen beweglichen, der andere über einen feststehenden Spiegel reflektiert wurde, gleichzeitig auf einem Detektor nachgewiesen werden. Die Messerfassungselektronik erfasst somit als Funktion der Position des beweglichen Spiegels die durch Interferenz hervorgerufenen Intensitätsschwankungen, das so genannte *Interferogramm*. Durch Fourier-Transformation wird anschließend aus diesem Interferogramm ein herkömmliches Spektrum der atmosphärischen Strahlung, d. h. die Intensität als Funktion der Wellenlänge berechnet. Die Vorteile der Fourier-Transformationsspektrometrie gegenüber der herkömmlichen dispersiven Spektrometrie sind die höhere zeitliche und spektrale Auflösung der Messungen sowie die erreichbare Wellenlängengenauigkeit. Mit dem bei EISAR eingesetzten flüssigstickstoffgekühltem HgCdTe/InSb-Schichtdetektor liegt der Messbereich bei 3,3 bis 20 µm, umfasst

also den wesentlichen Teil der terrestrischen Gegenstrahlung. Insbesondere kann der Bereich großer atmosphärischer Transmissivität, das so genannte atmosphärische Fenster zwischen etwa 7,7 und 14 µm beobachtet werden, was die für das GVaP-Programm der WMO geforderte Messung von Wasserdampf- und Temperaturprofilen in der unteren Troposphäre erlaubt. Feuchte- und Temperaturprofilmessungen sind damit das vorrangige Anwendungsgebiet, für das EISAR am Meteorologischen Observatorium Lindenberg überwiegend eingesetzt wird. Nach Abschluss der Erprobungsphase von EISAR sind zukünftig Messungen dieser Parameter mit einer zeitlichen Auflösung von etwa 10 min vorgesehen.

Die über die Feuchte- und Temperatursondierung hinausgehenden Anwendungsmöglichkeiten für die FTIR-Spektrometrie in der Atmosphäre werden am MOL nicht im Rahmen des Monitoring-Programms genutzt. So weist z. B. das Spurengas Ozon im Spektrum charakteristische Linien auf, deren Analyse eine quantitative Aussage über seine Konzentration ermöglicht. Kann zudem der beobachtete Himmelsausschnitt frei gewählt werden (wie zum Beispiel bei EISAR über die Positionierung eines im Strahlengang befindlichen Sonnenfolgers), so stehen technisch nicht nur Emissions-, sondern auch Absorptionsspektren (Messung in Richtung der Sonne) zur Messung von Spurengasen zur Verfügung. Daneben zeigen auch Wolken- und Aerosolpartikeln Strahlungseffekte im Bereich des atmosphärischen Fensters, die sich mit Hilfe eines FTIR zur Gewinnung mikrophysikalischer Partikeleigenschaften nutzen lassen.

Eine erste Messung des FTIR-Systems EISAR am MOL zeigt Abb. 5-12. Dargestellt ist hier die Entwicklung der Zenitradianz der terrestrischen Gegenstrahlung während eines Wolkenaufzugs am MOL, am 23.08.2004. Aus der Abbildung wird deutlich, wie im Bereich des atmosphärischen Fensters, d. h. zwischen etwa 8 und 14 µm (Wellenlänge mit roten Zahlen markiert) die Radianz mit zunehmender Bewölkung ansteigt, wobei gleichzeitig der Kontrast der spektralen Signaturen von Wasserdampf (Einzellinien) und Ozon (Bande um 9,5 µm) absinkt.

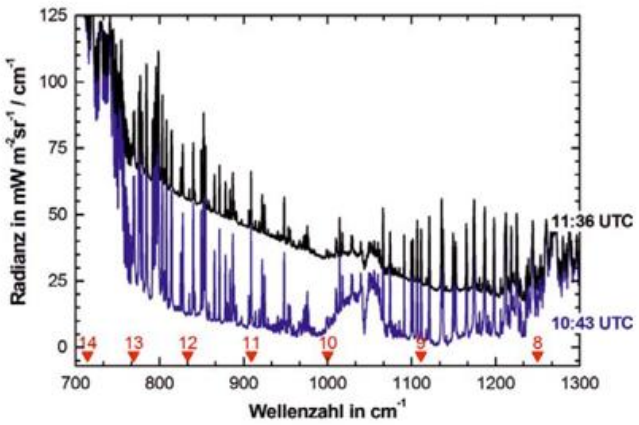


Abb. 5-12: Fourier-Transformations-Infrarot-Spektrometer „EISAR": Beispiel der zeitlichen Entwicklung des atmosphärischen IR-Spektrums auf der Grundlage von EISAR-Spektren am MOL vom 23. 08. 2004 zwischen 10:40 und 11:30 UTC (rote Zahlen auf der Abszisse entsprechen der Wellenlänge in µm).

7 Schlussfolgerungen

Mit seiner messtechnischen Ausstattung stellt die bodengebundene Fernerkundung am Observatorium Lindenberg in Europa eine einzigartige Einrichtung zur Überwachung der Atmosphäre dar, die weltweit z. Zt. nur mit dem ARM-CART Observatorium nahe Lamont in Oklahoma (USA) vergleichbar ist. Ein wesentlicher Schwerpunkt des Aufgabenspektrums der Fernerkundung am Observatorium Lindenberg, das neben den in diesem Beitrag knapp beschriebenen Basisgeräten noch zahlreiche Hilfs- bzw. Zusatzsysteme, wie z. B. ein Fesselballon-Sondensystem, zwei GPS-Empfangsantennen zur Bestimmung des Wasserdampfsäulengehalts, ein Mikro-Regenradar, verschiedene Laser-Ceilometer sowie verschiedene Bodenmesssysteme umfasst, wird daher auch in Zukunft, neben der Fortführung des Monitoringprogramms mit Hilfe von Wind-Profil-Radar, Wolkenradar, Wasserdampf-Lidar und Mikrowellenprofiler in der Erprobung bzw. Weiterentwicklung aktueller bzw. neuartiger Geräte sowie Auswerteverfahren liegen. In diesem Sinne unterstützt dieser Bereich des MOL maßgeblich die laufende Optimierung des aerologischen Messnetzes des DWD. Für das aerologische Netz des DWD werden darüber hinaus die vier operationellen WPR/RASS des DWD-WPR-Messnetzes wissenschaftlich durch das Observatorium Lindenberg betreut.

Literatur

BRIGGS, B. H., 1980: Radar observations of atmospheric winds and turbulence: A comparison of techniques, *J. Atmos. Terr. Phys.* **30**, No. 9-10, 823-833.

BRIGGS, B. H., 1984: The analysis of spaced sensor records by correlation techniques. Handbook for MAP, vol. 13, 166-186, SCOSTEP Secr., Univ. of Illinois, Urbana.

COONEY, J., 1970: Remote measurements of atmospheric water-vapour profiles using the Raman component of laser backscatter, *J. Appl. Meteorol.* **9**, 182-184.

DIBBERN, J. (Hrsg.), 2001: COST 76 Final Report „Development of VHF/UHF wind profilers and vertical sounders for use in European observing systems", European Commission, Directorate-General XIII, Luxembourg 2001, 433 S.

DOVIAK, R. J., D. S. ZRNIC, 1993: Doppler Radar and Weather Observations. 2nd Ed. *Academic Press*, San Diego, California, 562 S.

DWD, 2000: „Satellite application facility on climate monitoring: Science Plan," Tech. Rep. SAF/CM/DWD/SCI3.0, Deutscher Wetterdienst (DWD), 63004 Offenbach, Deutschland, 154 S.

ENGELBART, D., H. STEINHAGEN, U. GÖRSDORF, J. LIPPMANN, J. NEISSER, 1996: A 1290 MHz profiler with RASS for monitoring wind and temperature in the boundary layer, *Beitr. Phys.Atm.* **69**(1), 63-80.

ENGELBART, D., U. GÖRSDORF, W. RUHE, 1998: Effects and observation of migrating birds on a boundary-layer windprofiler in Eastern Germany, *Met. Z., N.F.* **7**, 280-287.

ENGELBART, D., H. STEINHAGEN, U. GÖRSDORF, J. NEISSER, H.J. KIRTZEL, G. PETERS, 1999: First results of measurements with a newly-designed phased-array sodar with RASS, *Met. Atmos. Phys.* **71**, 61-68.

GAGE, K. S., 1990: Radar observations of the free atmosphere: Structure and dynamics, in: D.Atlas (Hrsg.), Radar in Meteorology, *Amer. Meteorol. Soc.*, Boston, 806 S.

GÖRSDORF, U., 2000: Genauigkeit und Verfügbarkeit von Windprofiler-/RASS-Messungen, *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* **209**, Selbstverlag des DWD, Offenbach am Main, 171 S.

GÖRSDORF, U., V. LEHMANN, 2000: Enhanced accuracy of RASS-measured temperatures due to an improved range correction, *J. Atm. Ocean.Techn.* **17**, 406-416.

GÖRSDORF, U, F. BEYRICH, H. DIER, U. LEITERER, 2002: Composite wind and temperature profiles obtained from a complex of in-situ and remote sensing measurement systems for the forcing of a boundary layer model, *Theor. Appl. Climatol.* **73**, No.1-2, 97-105.

GÜLDNER, J., SPÄNKUCH, D., 2001. Remote sensing of the thermodynamic state of the atmospheric boundary layer by ground-based microwave radiometry. *J. Atmos. Oceanic Technol.* **18**, 925-933.

HILDEBRANDT, P. H., SEKHON, R., 1974: Objective determination of the noise level in Doppler spectra, *J. Appl. Meteor.* **13**, 808-811.

HIRSCH, L., 2002: SADRASS, a compact wind- and temperature profiler for difficult sites. Workshop on COST Action 720, „Integrated Ground-Based Remote Sensing Stations for Atmospheric Profiling", L'Aquila (Italy), June 18-21, ohne Paginierung.

JANSSEN, M. A., 1993: An Introduction to the Passive Remote Sensing of Atmospheres, in M. A. Janssen (Hrsg.), Atmospheric Remote Sensing by Microwave Radiometry, *J.Wiley & Sons, Inc.*, New York, 1-36.

LEHMANN, V., G. TESCHKE, 2001: Wavelet based methods for improved wind profiler signal processing, *Ann. Geophys.* **19**, 825-836.

MAY, P. T., R. G. STRAUCH, K. P. MORAN, W. L. ECKLUND, 1990: Temperature sounding by RASS with wind profiler Radars: A preliminary study, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **28**(1), 19-27.

MEASURES, R. M., 1992: Laser Remote Sensing, Fundamentals and Applications. *Krieger Publ.*, Malabar(Florida), 510 S.

OTTERSTEN, H. A., 1969: Radar backscattering from turbulent clear atmosphere, *Radio Sci.* **4**, 1251-1255.

PETERS, G., H. TIMMERMANN, H. HINZPETER, 1983: Temperature sounding in the planetary boundary layer by RASS-system: Analysis and results, *Int. J. Rem. Sens.* **4**(1), 49-63.

SOLHEIM, F., J. GODWIN, E. WESTWATER, Y. HAN, S. KEIHM, K. MARSH, R. WARE, 1998: Radiometric profiling of temperature, water vapor and liquid water using various inversion methods. *Radio Science* **33**, 393-404.

SPÄNKUCH, D., W. DÖHLER, J. GÜLDNER A. KEENS, 1996: Ground-based passive atmospheric sounding by FTIR emission spectroscopy – First results with EISAR. *Contrib. Atmos. Phys.* **69**, 97-111.

STEINHAGEN, H., J. DIBBERN, D. ENGELBART, U. GÖRSDORF, V. LEHMANN, J. NEISSER, J. W. NEUSCHAEFER, 1998: Performance of the first European 482 MHz wind profiler radar with RASS under operational conditions, *Met. Z., N.F.* **7**, 248-261.

TATARSKII, V. I., 1961: Wave propagation in a turbulent medium, *McGraw-Hill*, New York, 285 S.

TURNER, D. D., D.N. WHITEMAN, 2002: Remote Raman spectroscopy. Profiling water vapor and aerosols in the troposphere using Raman lidars, Handbook of Vibrational Spectroscopy. *John Wiley & Sons, Ltd*, J. M. Chalmers, P.,R. Griffith, Chichester(Hrsg.), **4**, 2857 - 2878.

ULABY, F. T., R. K. MOORE, A. K. FUNG, 1981: Microwave Remote Sensing. *Addison-Wesley*, 495 S.

VDI, 2005: Umweltmeteorologie – Bodengebundene Fernmessung des Windvektors – Doppler-Wind-Radar, VDI 3786 – Blatt 17, *Beuth-Verlag*, Berlin (Weißdruck in Vorbereitung).

WMO, 1999: „The WCRP/GEWEX Global Water Vapor Project (GVaP): Science Plan," Publ. 27, Internat.GEWEX Project Office, 1001 Wayne Ave., Silver Spring, Md. 20910 , 50 S.

WOODMAN, R. F., A. GUILLEN, 1974: Radar observations of wind and turbulence in the stratosphere and mesosphere. *J. Atmos. Sci.* **31**, 493-505.

promet, Jahrg. 31, Nr. 2–4, 148-158 (Oktober 2005)
© Deutscher Wetterdienst 2005

F. BEYRICH, T. FOKEN

6 Untersuchung von Landoberflächen- und Grenzschicht-Prozessen am Meteorologischen Observatorium Lindenberg

Studies into Land Surface and Boundary Layer Processes at the Meteorological Observatory Lindenberg

Zusammenfassung
Wechselwirkungsprozesse zwischen Atmosphäre und Unterlage spielen eine entscheidende Rolle im Wasser- und Energiekreislauf des Klimasystems. Ihr Verständnis ist damit essentiell für die Vorhersage der bodennahen Wetter- und Klimaverhältnisse. Aufbauend auf einer langjährigen Traditionen von Arbeiten zum Energiehaushalt und zu turbulenten Austauschprozessen am Meteorologischen Observatorium Potsdam wurde in den 1990er Jahren die Untersuchung von Landoberflächen- und Grenzschichtprozessen am MOL zu einem eigenständigen Schwerpunkt experimenteller Arbeiten im Rahmen des Konzeptes der „Lindenberger Säule" entwickelt. Es wurden ein spezielles Grenzschicht-Messfeld sowie Messnetze zur Erfassung bodennaher mittlerer und turbulenter atmosphärischer Parameter in der Umgebung des MOL aufgebaut. Im Beitrag werden einige Ergebnisse aus den seit 1998 laufenden Dauermessprogrammen sowie von Feldexperimenten in Verbindung mit dem LITFASS- (**L**indenberg **I**nhomogeneous **T**errain – **F**luxes between the **A**tmosphere and the **S**urface: A long-term **S**tudy) Programm dargestellt und diskutiert.

Abstract
Interaction processes between the land surface and the atmosphere play an important role in the water and energy cycles of the climate system. Their understanding and adequate description in numerical models is thus fundamental for the prediction of near-surface weather and climate conditions. Based on a long tradition at the Meteorological Observatory Potsdam in the field of energy budget and turbulent process studies, the investigation of land surface and boundary layer processes became a part of the experimental measurement programme at the Meteorological Observatory Lindenberg within the concept of the „Lindenberg Column" during the 1990ies. A special boundary layer field site (the „Grenzschichtmessfeld", GM) close to the village of Falkenberg and regional networks of stations for the measurement of mean and turbulent near-surface atmospheric parameters have been set into operation. The article presents selected results from the operational measurement programme (that started in 1998) and from field campaigns that took place in the Lindenberg region within the frame of the LITFASS (**L**indenberg **I**nhomogeneous **T**errain – **F**luxes between the **A**tmosphere and the **S**urface: A long-term **S**tudy) programme.

1 Einleitung

Unter der **a**tmosphärischen **G**renz**s**chicht (AGS) wird gemeinhin derjenige untere Bereich der Atmosphäre verstanden, welcher auf Zeitskalen von einigen Minuten bis hin zu einigen Stunden unmittelbar durch die darunter liegende Erdoberfläche beeinflusst wird und sich mit dieser über den Austausch von Impuls, Energie und Materie in direkter Wechselwirkung befindet (z. B. STULL 1988, GARRATT 1992, ARYA 2001). Ihre Mächtigkeit variiert je nach geographischen und klimatischen Bedingungen zwischen einigen Dekametern und einigen Kilometern, typische AGS-Höhen über Mitteleuropa am Tage liegen im Winter bei wenigen Deka- oder Hektometern, im Sommer bei bis zu zwei oder drei Kilometern. Eine detaillierte Charakterisierung und Vorhersage von Parametern und Prozessen in der AGS ist für die moderne Gesellschaft von fundamentalem Interesse, spielen sich doch nahezu alle menschlichen Aktivitäten innerhalb dieses Bereiches der Atmosphäre ab. Es ist deshalb konsequent, dass die Untersuchung und Beschreibung der AGS heute einen eigenständigen Zweig innerhalb der atmosphärischen Wissenschaften darstellt. Dessen Herausbildung kann etwa in den 1960er Jahren angesiedelt werden, nachdem zuvor in den 1950er Jahren erstmals in monographischer Form umfassende, auf experimentellen Daten basierende Beschreibungen der Struktur der AGS vorgelegt worden waren (SCHNEIDER-CARIUS 1953, LETTAU und DAVIDSON 1957). Die historischen Wurzeln spezieller Untersuchungen der bodennahen Luftschichten reichen weiter zurück und sind durch GEIGER (1927) erstmals systematisch und umfassend dargestellt worden.

Wegen ihrer unmittelbaren Relevanz für das Leben und die gesellschaftlichen Aktivitäten des Menschen stellt die Prognose von atmosphärischen Zustands- und Prozessgrößen im Bereich der AGS ein zentrales Ziel der Wetter- und Klimavorhersage dar. Grenzschichtprozesse haben typische Raum- bzw. Zeitskalen von 10^0 bis 10^4 m bzw. s und tragen damit für die heute im Bereich der numerischen Wettervorhersage und der Klimamodellierung genutzten Simulationsmodelle überwiegend subskaligen Charakter, d. h., sie können mit den üblichen Gitter-Maschenweiten nicht explizit aufgelöst werden und sind deshalb in geeigneter Weise zu parameterisieren. Die verwendeten Parameterisie-

rungen müssen die unter mitteleuropäischen Bedingungen in der Regel ebenfalls subskalige Heterogenität der Landoberfläche entsprechend berücksichtigen. Die adäquate Beschreibung der Wechselwirkungsprozesse zwischen Atmosphäre und Unterlage in den Modellen ist dabei von essentieller Bedeutung für die richtige Vorhersage solcher Parameter wie der Temperatur, der Luftfeuchtigkeit und des Windes in Bodennähe und damit zugleich für die Prognose des Auftretens von Phänomenen wie Bodenfrost, Tau, Nebel usw. Über den Austausch und Transport von Wasserdampf sind Grenzschichtprozesse darüber hinaus auch von Bedeutung für die Wolken- und Niederschlagsbildung, deren Vorhersage eingeschlossen. Für die Entwicklung, Verbesserung und Validierung der in Wettervorhersage- und Klimamodellen genutzten Grenzschichtparameterisierungen ist die Verfügbarkeit umfassender, qualitätsgeprüfter Datensätze eine unabdingbare Voraussetzung. Derartige Datensätze sollten aus verschiedenen geographischen und klimatischen Regionen vorliegen und für einen gegebenen Standort ein breites Spektrum meteorologischer Situationen repräsentieren. Ihre Gewinnung erfordert ein komplexes Langzeitmessprogramm unter Nutzung moderner in-situ Messverfahren sowie bodengebundener und satellitengestützter Fernsondierungssysteme. Für die Satellitensysteme, mit denen eine flächendeckende Charakterisierung von Eigenschaften der Landoberfläche und der Atmosphäre erreicht werden kann und deren Daten deshalb für die Assimilation in Wettervorhersagemodellen von besonderem Interesse sind, sind lokale in-situ Messungen an ausgewählten Referenzstandorten ebenso unverzichtbar, um die Strahlungstransportmodelle und Auswerte-Algorithmen, in denen wiederum eine Vielzahl von Modellannahmen und Parameterisierungen enthalten sind, entsprechend zu kalibrieren, anzupassen und weiterzuentwickeln.

Vor diesem Hintergrund ergibt sich als Aufgabe für Grenzschicht-Messungen an einem meteorologischen Observatorium die umfassende experimentelle Erfassung und Charakterisierung von Landoberflächen- und Grenzschichtparametern und -prozessen im Rahmen eines operationellen Messprogramms als integraler Bestandteil eines die gesamte vertikale Säule der Atmosphäre umfassenden Monitoring. Dies beinhaltet die Bereitstellung vollständiger, konsistenter und qualitätsgeprüfter Datensätze zur Charakterisierung der Eigenschaften des Bodens, der Vegetation und der AGS sowie der Wechselwirkungsprozesse zwischen diesen Sphären unter besonderer Berücksichtigung der räumlichen Variabilität bzw. Repräsentativität über einer heterogenen Landoberfläche. Mit dem Ziel der Erfüllung eben dieser Aufgabe wurde Mitte der 1990er Jahre am Meteorologischen Observatorium Lindenberg das Sachgebiet „Landoberflächenprozesse und Grenzschicht" eingerichtet und nachfolgend mit der Konzipierung und schrittweisen Realisierung eines solchen Messprogramms begonnen.

2 Historischer Überblick

Spezielle Messungen im Bereich der AGS und mikrometeorologische Forschung waren, bedingt durch die Ausrichtung des Observatoriums auf die Aerologie, zunächst über Jahrzehnte hinweg nicht Gegenstand der Arbeiten am MOL (DUBOIS 1993). Ihre Wurzeln sind vielmehr am Meteorologischen Observatorium Potsdam (MOP, vgl. KÖRBER 1993) zu suchen. Bereits 1912/13 fand Barkow bei der Auswertung der Potsdamer Windregistrierungen, dass in diesen organisierte Strukturen charakteristischer Stärke und Andauer zu finden waren und prägte dafür die noch heute übliche Bezeichnung der ‚Turbulenzelemente' (BARKOW 1914). In den 1920er und 1930er Jahren verhalf Albrecht mit seinen gerätetechnischen Arbeiten zur Temperatur-, Wind- und Strahlungsmessung den durch Schmidt begründeten Methoden zur Bestimmung des Energieaustausches zwischen der Atmosphäre und der Unterlage zum Durchbruch. Hierzu gehörten Messungen am Sacrower See bei Potsdam und die als Bahn brechend geltende Arbeit zum Wärmehaushalt der Erde von ALBRECHT (1940). Nach dem 2. Weltkrieg wurden Albrechts Arbeiten ab 1948 durch Skeib fortgesetzt, zunächst vorwiegend mit Untersuchungen über Gletschern und in der Antarktis.

In Lindenberg wurden ab 1946 für etwa ein Jahrzehnt die 80m-Türme der ehemaligen Langwellen-Funksender genutzt, um zunächst in festen Höhen, später auch an Seilaufzügen mikrometeorologische Messungen durchzuführen (z. B. RINK 1953, vgl. auch Abb. 6-1). Die Erkenntnis, dass die größten Änderungen meteorologischer Größen in den untersten 10 m auftreten, führte zum Aufbau eines 10-m-Mastes, an dem 1953/54 Wind- und Temperaturmessungen durchgeführt wurden. Die Auswertung dieser Messungen erfolgte jedoch eher in aerologisch-beschreibender Form denn hinsichtlich mikrometeorologischer Parameter, wie Energieflüssen oder Stabilitätsmaßzahlen, also weitgehend unabhängig von den Albrecht'schen Arbeiten. Im Internationalen Geophysikalischen Jahr 1957 führte Gerstmann Energieaustauschmessungen sowohl in Lindenberg als auch im Nordatlantik durch. Die Erfahrungen aus den Lindenberger Messungen wurden

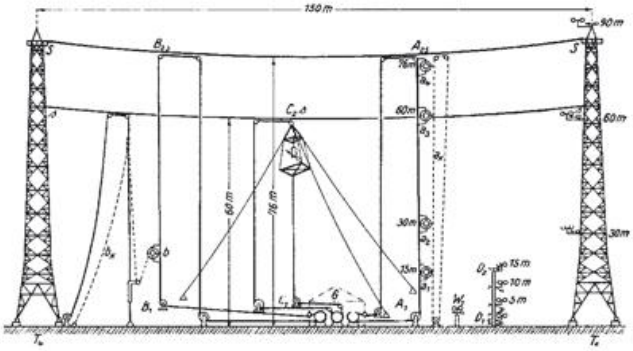


Abb. 6-1: Schematische Darstellung der Seilaufzugsanlagen der mikro-aerologischen Station in Lindenberg (aus Dubois, 1993).

durch Mücket ab den 1960er Jahren in die Turbulenzforschungen am MOP eingebracht, wobei die Verdienste von Mücket insbesondere auf dem Gebiet der Feuchtemessung mit optischen Verfahren liegen. Durch den Kauf eines ersten japanischen Ultraschallanemometers im Jahr 1968 durch Skeib gehörte das MOP zu den damals wenigen Forschungseinrichtungen in der Welt, die diese moderne Technik bereits Anfang der 1970er Jahre einsetzten. Es wurden Messungen sowohl über Land (an der Strahlungsmessstation Potsdam-Schlaatz und in Lindenberg) als auch über dem Meer (Küstenzone der Ostsee) durchgeführt, die Ergebnisse fanden Eingang in theoretische Arbeiten zum turbulenten Energieaustausch und zur Definition und Normierung universeller Funktionen (SKEIB 1980). Als Nachfolger von Skeib führte Foken ab 1981 diese Arbeiten durch die Beteiligung an mehreren internationalen Experimenten fort, u. a. über ebener, quasi-homogener Unterlage in der russischen Steppe (MESP-81, Cimljansk), in der nordböhmischen Industrielandschaft (KOPEX-86, Kopisty), und über einer heterogenen Agrarlandschaft bei Kursk südlich von Moskau (KUREX-88). 1992/1993 begann die Suche nach einem geeigneten Standort für ein „Gemeinsames Messfeld" von MOP und MOL zur Untersuchung von Landoberflächen- und Grenzschichtprozessen im Raum Lindenberg, parallel dazu fanden im Havelland experimentelle Vorstudien zu Energieflüssen über verschiedenen Unterlagentypen unter Berücksichtigung satellitengestützter Fernerkundung (Kooperation mit der FU Berlin) statt, welche die Grundlage für das spätere LITFASS Projekt des DWD (MÜLLER et al. 1995) bildeten. 1994 erfolgten schließlich der Umzug der Arbeitsgruppe „Turbulenz und Grenzschicht" von Potsdam nach Lindenberg und die Einrichtung des Sachgebietes „Landoberflächenprozesse und Grenzschicht" am MOL.

Die ersten Arbeiten in Lindenberg dienten der Wiederinbetriebnahme und Modernisierung der Messtechnik, der Vorbereitung des LITFASS-Projektes (vgl. Abschnitt 4) und dem Aufbau des Grenzschicht-Messfeldes (GM) bei Falkenberg. Mit dem LITFASS-Projekt (1995–2001) wurde schließlich die experimentelle Grenzschichtforschung am MOL etabliert und in ein operationelles Messprogramm zur Untersuchung von Grenzschicht- und Landoberflächenprozessen überführt (BEYRICH 2001).

3 Das Grenzschichtmessfeld (GM) Falkenberg

Das Grenzschichtmessfeld Falkenberg (NEISSER et al. 2002) mit seinem 99m-Mast stellt die zentrale Messbasis für die experimentelle Untersuchung von Landoberflächen- und Grenzschichtprozessen am MOL dar. Als Standort für das Messfeld (52°10' N, 14°07' E, 73 m NN) wurde eine ebene, in der klimatologischen Hauptwindrichtung über mehr als 1 km hindernisfreie Fläche nahe der Ortschaft Falkenberg etwa 5 km südlich von Lindenberg ausgewählt, da das Gelände des MOL selbst aufgrund seiner topographischen Gegebenheiten für die Durchführung repräsentativer Messungen in der Boden- und unteren Grenzschicht nicht geeignet ist.

Die Umgebung des MOL stellt eine eiszeitlich geprägte, leicht wellige Moränenlandschaft mit einer Reihe kleinerer und mittelgroßer Seen und Höhenunterschieden zwischen etwa 40 m NN im Bereich der Spree-Niederung und 130 m NN nordöstlich von Lindenberg dar. Wald- und Agrarflächen bestimmen mit jeweils 40 bis 45 % Flächenanteil die Landnutzung, Seen bedecken etwa 6–7 % der Fläche, Siedlungen und Verkehrswege weniger als 5 %. Diese Landschaftsform ist typisch für weite südlich an die Ostsee angrenzende Gebiete des nördlichen Mitteleuropa. Das Gelände in der unmittelbaren Umgebung des GM Falkenberg ist in NE-SW-Richtung geringfügig geneigt, die Höhenunterschiede im Umkreis von 1 km betragen jedoch weniger als 5 m. Das Messfeld selbst ist von Agrarflächen umgeben (vgl. Abb. 6-2), im Südosten schließen sich an die Felder in etwa 600 m Entfernung die ersten Häuser von Falkenberg an, nach Westen beginnt in etwa 1,5 km Entfernung ein kleines Waldgebiet.

Der für das Messfeld charakteristische Bodentyp sind Fahlerden aus Sand über Lehm, die Lehmschicht be-

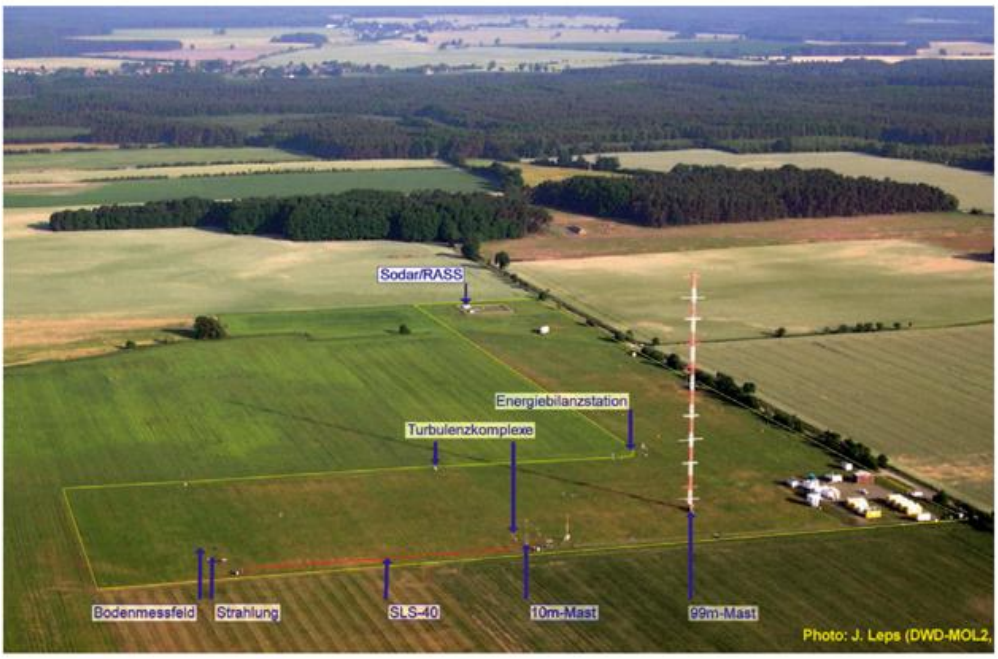


Abb. 6-2: Das Grenzschicht-Messfeld (GM) Falkenberg in Richtung WNW.

ginnt in der Regel in 50 bis 70 cm Tiefe. Die Vegetation auf dem Messfeld besteht aus verschiedenen Gräsern mit unterschiedlicher Bewuchsdichte und in natürlicher Weise durchmischt mit zahlreichen (Un-)Kräutern, Leguminosen etc. Die mittlere Bestandeshöhe wird durch mehrfache Mahd im Verlaufe eines Jahres kleiner 20 cm gehalten.

Das operationelle Messprogramm auf dem GM Falkenberg umfasst die Bestimmung aller wesentlichen physikalischen Parameter zur Charakterisierung der Wechselwirkungsprozesse zwischen Atmosphäre und Unterlage. Hierzu zählen Messungen der Strahlungsbilanzkomponenten im kurz- und langwelligen Bereich, der Wolkenhöhe und des Niederschlages, von Druck, Temperatur, Wasserdampfgehalt und Strömungsgeschwindigkeit der Luft, von Bodentemperatur und -wassergehalt sowie der turbulenten Austauschströme von Impuls und Energie. Messungen mit in-situ-Sensorik werden an mehreren Masten bis zu einer Höhe von knapp 100 m durchgeführt. Ein Sodar-RASS System dient der Messung von Wind- und Temperaturprofilen im Höhenbereich zwischen etwa 50 m und (je nach Messbedingungen) 200 bis 400 m über Grund und ermöglicht damit in Bezug auf die „Lindenberger Säule" den Anschluss der bodennahen Mastmessungen an die Profilmessungen in größeren Höhen mittels Windprofiler/RASS und Radiosonde am Standort des MOL. Die Anordnung der einzelnen Messkomplexe und der Infrastruktur (Geräteträger, Energieversorgung, Datenerfassung, Arbeitsplätze, Lager- und Kalibriermöglichkeiten) auf dem GM Falkenberg ist aus Abb. 6-2 ersichtlich.

Die operationellen Messungen auf dem GM Falkenberg werden im Wesentlichen auf dem südlich des Container-Areals gelegenen Gelände durchgeführt, während der sich nach Westen erstreckende Schenkel zwischen Container-Areal und Sodar-Standort vorwiegend als Fläche für temporäre Messungen (Tests, Geräteerprobungen) dient und zugleich eine geeignete Messbasis für Gäste im Rahmen von Praktika und Feldexperimenten darstellt.

Nach entsprechenden Voruntersuchungen zur Standortcharakterisierung in den Jahren 1996/97 erfolgten 1997/98 die Einrichtung des Messfeldes und im Mai 1998 der Beginn des operationellen Basismessprogramms. In den folgenden Jahren wurde das Messprogramm schrittweise ergänzt und komplettiert. Für zahlreiche Messgrößen liegen damit in der Zwischenzeit mehr als 5-jährige Zeitreihen vor, die eine erste Charakterisierung der Struktur der bodennahen Grenzschicht sowie von Wechselwirkungsprozessen zwischen Atmosphäre und Unterlage ermöglichen und geeignet sind für klimatologische Studien auf der saisonalen und interannuellen Zeitskala sowie als Antriebs- und Vergleichsdaten für Modelluntersuchungen. Dies sei im Folgenden anhand einiger Beispiele illustriert.

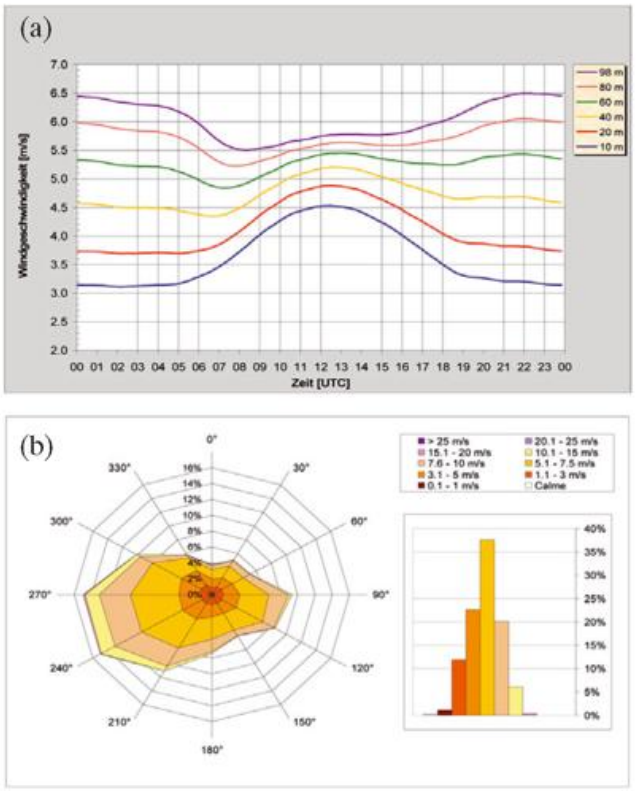


Abb. 6-3: Ergebnisse von Windmessungen (1999-2004) am 99m Mast auf dem GM Falkenberg: (a) mittlerer Tagesgang der Windgeschwindigkeit in sechs Höhen, (b) mittlere Windrose und Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit im 98 m-Niveau.

In Abb. 6-3 a ist der mittlere Tagesgang der Windgeschwindigkeit in verschiedenen Höhen unterhalb von 100 m aus Messungen am 99m-Mast dargestellt. Die mittlere Windgeschwindigkeit in Falkenberg beträgt in 10 m Höhe 3,6 m/s und nimmt bis auf 6,0 m/s in 98 m Höhe zu. Im Tagesgang sind markante Unterschiede zwischen den bodennahen Luftschichten und den größeren Höhen erkennbar. In 10 m Höhe tritt das Minimum der Windgeschwindigkeit in den frühen Morgenstunden bei stark stabiler Schichtung auf, das Maximum wird im Ergebnis des erhöhten vertikalen Impulsaustausches in der instabilen AGS am frühen Nachmittag beobachtet. In den oberen beiden Messhöhen am 99m-Mast werden die höchsten mittleren Windgeschwindigkeiten in den Nachtstunden gemessen, eine Folge der Entkopplung dieses Bereiches von den bodennahen Luftschichten bei stabiler Schichtung und des damit reduzierten Vertikalaustausches sowie der häufigen Ausbildung sogenannter nächtlicher „Low-Level-Jets" infolge von Trägheitsschwingungen des Windvektors. Die Umkehr zwischen den beiden beschriebenen unterschiedlichen Tagesgang-Typen der Windgeschwindigkeit wird in Falkenberg in etwa 60 m Höhe beobachtet. Abb. 6-3 b zeigt die Häufigkeitsverteilungen von Windgeschwindigkeit und -richtung in 98 m Höhe. Erkennbar ist die Dominanz von südwestlichen und westlichen Windrichtungen, ein sekundäres Maximum weisen östliche bis südöstliche Windrichtungen auf.

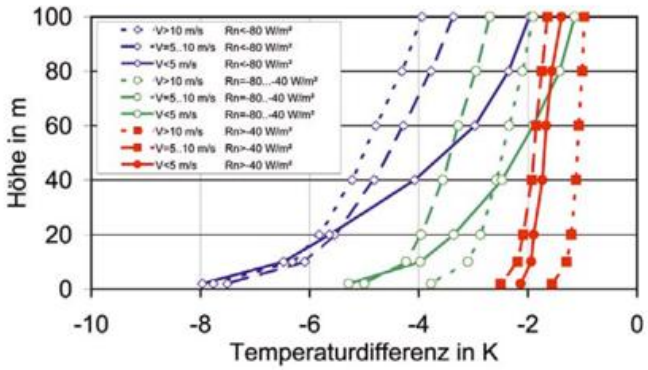


Abb. 6-4: Mittlere Profile der Temperaturabnahme in der bodennahen Grenzschicht auf dem GM Falkenberg während der ersten sechs Stunden nach Sonnenuntergang für verschiedene Klassen der Windgeschwindigkeit und der Nettostrahlung im Jahr 2003.

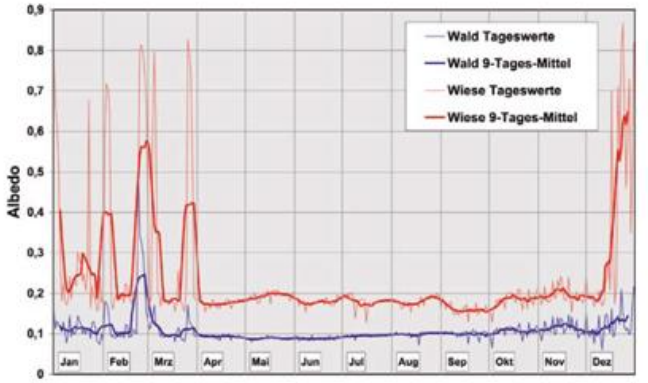


Abb. 6-5: Jahresgang der mittleren Albedo (08–14 UTC) über Gras (GM Falkenberg) und über einem Kiefernwald (Messstation Forst Kehrigk) während des Jahres 2001.

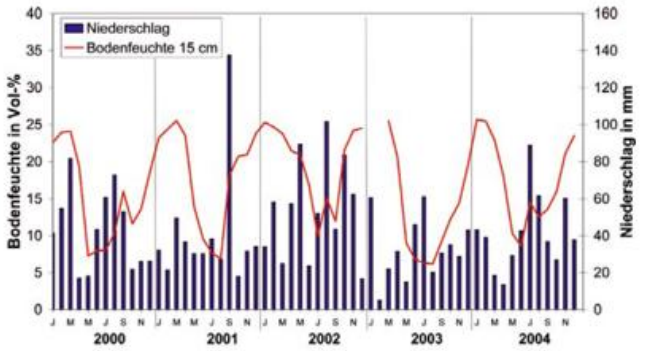


Abb. 6-6: Monatssummen des Niederschlages und Monatsmittelwerte der Bodenfeuchte in 15 cm Tiefe auf dem GM Falkenberg im Zeitraum Januar 2000 bis Dezember 2004.

Mittlere Profile der nächtlichen Temperaturabnahme in den ersten sechs Stunden nach Sonnenuntergang in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit (V) in 200 m Höhe sowie von der (langwelligen) Nettostrahlung (Rn) für das Jahr 2003 zeigt Abb. 6-4. Die stärkste Abkühlung tritt bei hohen negativen Strahlungsbilanzen auf, wovon bei niedrigen Windgeschwindigkeiten vor allem die bodennahen Luftschichten erfasst sind, während bei mittleren und hohen Windgeschwindigkeiten auch in 100 m Höhe noch mittlere Abkühlungsbeträge von bis zu 4 K erreicht werden. Bei geringen negativen Strahlungsbilanzen ist die Abkühlung nur wenig von der Windgeschwindigkeit abhängig.

Der Jahresgang der Albedo als Verhältnis von reflektierter zu einfallender kurzwelliger Strahlung im Verlauf des Jahres 2001 ist in Abb. 6-5 für die Grasfläche des GM Falkenberg im Vergleich mit Messungen über einem Kiefernwald dargestellt. Verwendet wurden zur Berechnung der mittleren Albedo für jeden Tag alle Messwerte zwischen 08 und 14 UTC. Neben den Tageswerten zeigt die Abbildung außerdem noch ein über jeweils 9 Tage gleitendes Mittel. Im Sommerhalbjahr, d. h., bei aktiver Vegetation, liegt die Albedo des Messfeldes im Mittel bei 0,18, die Schwankungen spiegeln im Wesentlichen feuchte bzw. trockene Perioden wieder (reduzierte Albedo bei hoher Bodenfeuchte). Höhere mittlere Werte im Winterhalbjahr sind auf den niedrigeren Sonnenstand zurückzuführen, außerdem sind mehrere Perioden mit Schneedecke erkennbar, bei frisch gefallenem Neuschnee werden Albedowerte >0,80 gemessen. Im Wald treten erhöhte Werte nur kurzzeitig auf, solange sich der Schnee auf den Kronen der Kiefern hält, die mittlere Albedo beträgt etwa 0,10.

Abb. 6-6 zeigt den Verlauf von Niederschlag und Bodenfeuchte in der oberen Bodenschicht über einen Zeitraum von mehreren Jahren. Erkennbar sind die durch den Witterungsverlauf bedingten, z. T. gravierenden Unterschiede zwischen den einzelnen Jahren. So war im trockenen Frühjahr 2003 der Bodenwassergehalt schon sehr zeitig auf Werte um 5 Vol-% gesunken, das herbstliche Wiederauffüllen des Bodenwasservorrates erfolgte z. B. 2001 bereits im September, 2003 hingegen erst gegen Ende des Jahres. Zum Ende des Winters beträgt die Bodenfeuchte in 15 cm Tiefe typischerweise etwa 25 Vol-%. Fehlende Werte im Januar und Februar 2003 sind auf einen längere Zeit gefrorenen Boden zurückzuführen, bei Frost ist eine zuverlässige Bestimmung der Bodenfeuchte nicht sinnvoll möglich.

4 Das LITFASS-Projekt

Im Zusammenhang mit Entwicklungen der numerischen Wettervorhersage im DWD und als Beitrag zum Konzept „Observation und Simulation“ wurde am MOL von 1995 bis 2001 das Projekt LITFASS realisiert (MÜLLER et al. 1995, BEYRICH 2001, BEYRICH et al. 2002). LITFASS ist ein Akronym und steht für „**L**indenberg **I**nhomogeneous **T**errain – **F**luxes between the **A**tmosphere and the **S**urface: a long-term **S**tudy“. Ziel des Projektes war die Entwicklung, Erprobung und Inbetriebnahme eines Systems zur Untersuchung von Wechselwirkungsprozessen zwischen der Atmosphäre und einer heterogenen, für Mitteleuropa typischen Landoberfläche auf der Meso-γ Skala (2–20 km). LITFASS umfasste drei wesentliche Komponenten:

- den Aufbau von Messsystemen und Messnetzen zur experimentellen Charakterisierung von Landoberflächen- und Grenzschichtprozessen in einem etwa 20 km x 20 km großen Gebiet in der Umgebung des MOL,
- die Entwicklung des LITFASS-Lokal-Modells (LLM), eines nicht-hydrostatischen numerischen Modells mit einer horizontalen Gittermaschenweite von 100 m x 100 m (vgl. HERZOG et al. 2002), und
- den Aufbau einer Datenbank als Schnittstelle zwischen Messung und Modellaktivitäten.

Die Messungen am MOL und in dessen Umgebung sollten dabei sowohl die Anfangs- und Randbedingungen für die Modellsimulationen liefern als auch Datensätze für die Modellvalidierung bereitstellen, letzteres gleichermaßen an einzelnen Messpunkten über typischen, lokal homogenen Oberflächen und als regional repräsentatives Flächenmittel. Neben dem Messprogramm am MOL und auf dem GM Falkenberg wurden deshalb im Projekt LITFASS Messnetze für Niederschlags- und Globalstrahlungsmessungen sowie ein Messnetz von Energiebilanzstationen geschaffen. Das **E**nergie**b**ilanz**m**ess**n**etz (EBMN) besteht aus bis zu 7 mikrometeorologischen Messstationen, die über verschiedenen, typischen Oberflächen zeitweise oder im Dauerbetrieb ein umfassendes Messprogramm zur Charakterisierung der Wechselwirkung zwischen Atmosphäre und Unterlage ermöglichen. Erfasst werden, wie auch auf dem GM Falkenberg, alle wesentlichen physikalischen Zustandsgrößen von Luft und Boden, kurz- und langwellige Strahlung und die turbulenten Energieflüsse. Das Niederschlags- und Globalstrahlungsmessnetz umfasst bis zu 15 registrierende Niederschlagssammler, von denen 5 zusätzlich mit einem Globalstrahlungssensor ausgerüstet sind. Die Kombination beider Messnetze erlaubt die Charakterisierung der Variabilität der wesentlichen Antriebsparameter für den regionalen Energie- und Wasserkreislauf mit einer zeitlichen Auflösung der Messdaten von 10 min. Zur Abschätzung räumlich gemittelter Werte für den turbulenten Wärmefluss wurde in Kooperation mit der Universität Wageningen (Niederlande) ein **L**arge-**A**perture **S**cintillometer (LAS) über einen Messpfad von 4,7 km Länge zwischen dem GM Falkenberg und dem MOL in Betrieb genommen. Mit einem LAS werden Intensitäts-Fluktuationen von elektromagnetischer Strahlung gemessen, die auf Schwankungen des Brechungsindex der Luft zurückzuführen sind. Diese Brechungsindex-Fluktuationen wiederum werden durch turbulenzbedingte Temperatur-Fluktuationen hervorgerufen, so dass unter Nutzung von Ansätzen aus der Ähnlichkeitstheorie der turbulente fühlbare Wärmefluss am Boden bestimmt werden kann. Abb. 6-7 gibt einen Überblick über die Konfiguration der verschiedenen Messnetze und -systeme im LITFASS-Untersuchungsgebiet.

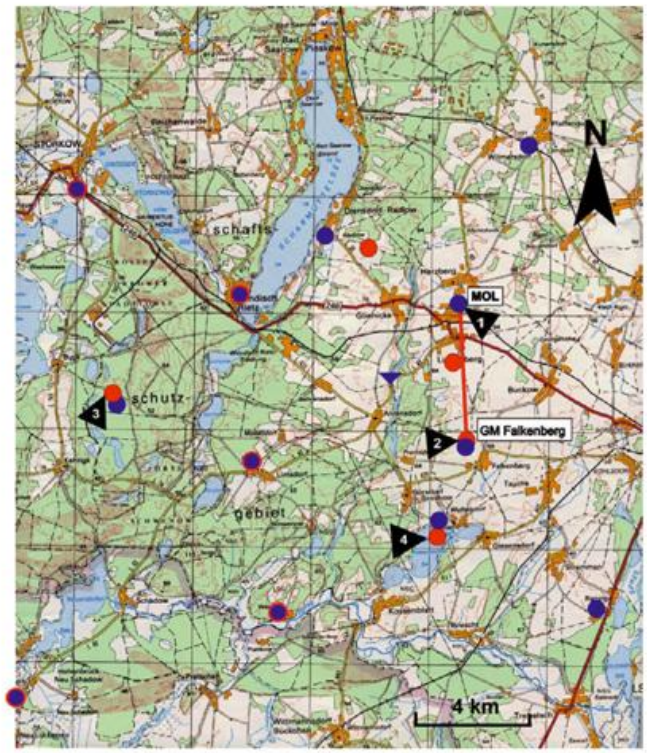


Abb. 6-7: Verteilung der Messstellen der im Projekt LITFASS geschaffenen Messnetze in der Umgebung des MOL (rote Kreise: Energiebilanzstationen, blaue Kreise: Niederschlagsmessstellen, blaue Kreise mit rotem Ring: Messstellen von Niederschlag und Globalstrahlung, blaues Dreieck: Pegelmessstelle, rote Linie: Large-Aperture-Scintillometer Messpfad). Anmerkung: Die Darstellung basiert auf einer Topographischen Karte TK100, die Reproduktion erfolgt mit freundlicher Genehmigung des Landesvermessungsamtes Brandenburg unter der Nummer GB57/01.

Schwerpunkt der wissenschaftlichen Arbeiten zu LITFASS ist die Charakterisierung des Energieaustausches zwischen Atmosphäre und heterogener Unterlage auf verschiedenen Skalen. Markant sind dabei zunächst die Unterschiede zwischen den Hauptlandnutzungstypen, Agrarland und Kiefernwald. Bedingt sowohl durch die jeweiligen Vegetationsmerkmale als auch durch die für beide Landnutzungen typischen und voneinander abweichenden Eigenschaften des Bodens (Sand in den Wäldern, Sand über Lehm auf den landwirtschaftlich genutzten Flächen) ergeben sich signifikante Differenzen in Bezug auf den Energieaustausch mit der Atmosphäre. Dies wird durch Abb. 6-8 illustriert, in der die mittleren Tagesgänge von Strahlungsbilanz (Rn) sowie fühlbarem (H) und latentem (LE) Wärmefluss für je einen Winter-, einen Sommer- und einen Monat aus der Übergangsjahreszeit dargestellt sind. Es ist erkennbar, dass nahezu unabhängig von der Jahreszeit die Nettostrahlung über dem Kiefernwald etwa 25 % höher als über der Grasfläche des GM Falkenberg ist (im Winter ist bei temporärer Schneedecke der Unterschied z. T. noch größer). Hervorgerufen werden diese Differenzen sowohl durch die geringere Albedo der Waldoberfläche (vgl. Abb. 6-5) als auch durch die unterschiedlichen Oberflächentemperaturen und die sich daraus ergebenden Unterschiede in der Wärmestrahlung. Noch ausgeprägter sind sie

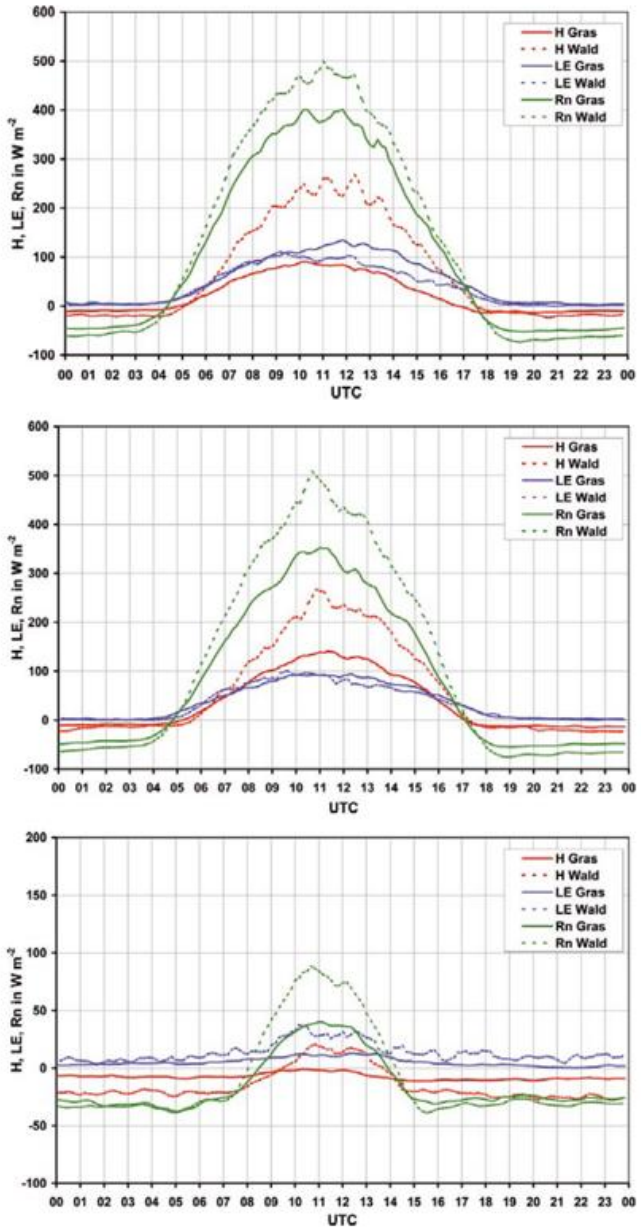


Abb. 6-8: Mittlerer Tagesgang von Strahlungsbilanz sowie fühlbarem und latentem Wärmefluss über Gras (GM Falkenberg) und über einem Kiefernwald (Messstation Forst Kehrigk) in den Monaten Mai 2003 (oben), August 2003 (Mitte) und Januar 2004 (unten).

beim fühlbaren Wärmefluss, der über dem Wald typischerweise um den Faktor zwei größer ist als über der Wiese. Ermöglicht wird dies durch die größere Menge an verfügbarer Energie, davon wird durch die Kiefernvegetation auf sandigem Boden im Vergleich zur Grasfläche weniger Energie für die Verdunstung aufgewendet, die absoluten Differenzen zwischen den latenten Wärmeflüssen über Wald und Wiese sind vergleichsweise gering, bei ausreichendem Energie- und Wasservorrat ist die Verdunstung über der Wiese höher.

In Bezug auf eine Verifikation der in numerischen Wettervorhersage- und Klimamodellen zur Beschreibung der Austauschprozesse an der Erdoberfläche genutzten Parametrisierungen ebenso wie im Hinblick auf die Validierung von Algorithmen zur Ableitung von Landoberflächenparametern und Energieflüssen aus Satellitendaten besteht die Aufgabe, repräsentative Mittel der Energieflüsse auf der Skala einer Modellgitterzelle bzw. eines Satellitenbildpixels zu ermitteln. Auch am MOL erprobte Methoden zur Bestimmung flächengemittelter Werte der turbulenten Flüsse aus Messungen sind u. a.

- die geeignete Mittelung der lokal über verschiedenen Oberflächen gemessenen Flüsse, dies setzt voraus, dass Messungen über allen relevanten Unterlagen an jeweils repräsentativen Standorten durchgeführt werden und mesoskale Zirkulationen keinen wesentlichen Beitrag zum bodennahen Austausch liefern,
- der Einsatz räumlich integrierender Messverfahren (Sctintillometer-Messungen, Flugzeugmessungen in niedrigen Höhen),
- die Nutzung bodengebundener Fernsondierungssysteme für Flussprofilmessungen innerhalb der AGS, hieraus können in der gut durchmischten Grenzschicht, in der die Profile mittlerer und turbulenter Größen eine wohldefinierte Struktur aufweisen, die Bodenflüsse abgeleitet werden,
- die Abschätzung der bodennahen Flüsse aus der integralen zeitlichen Entwicklung der Grenzschicht (Höhe der AGS sowie mittlere Werte von potentieller Temperatur und Wasserdampfgehalt der Luft, sog. Budget-Methoden), was allerdings sehr hohe Anforderungen an die Genauigkeit und zeitliche Auflösung der verwendeten Vertikalsondierungen stellt und darüber hinaus voraussetzt, dass Advektion und großräumige Vertikalbewegungen entweder bekannt oder vernachlässigbar sind.

Viele dieser Verfahren sind bisher noch nicht operationell einsetzbar, können jedoch im Rahmen von Feldexperimenten angewendet werden.

5 Feldexperimente

Feldexperimente und Messkampagnen sind ein wesentlicher Bestandteil der experimentellen Forschung auf dem Gebiet der Grenzschichtmeteorologie. Bis in die 1980er Jahre wurden, bis auf wenige Ausnahmen, die meisten Datensätze zu Grenzschichtprozessen und Turbulenzparametern im Rahmen von Feldexperimenten gewonnen. Erst mit den entsprechenden Fortschritten auf den Gebieten der Sensortechnik sowie der Datenerfassung, -übertragung und -speicherung (wesentlich waren hierbei insbesondere die Entwicklung der Rechentechnik, der bodengebundenen Fernsondierungsverfahren und die weite Verbreitung des Ultraschallanemometers) wurden in den 1990er Jahren an verschiedenen Standorten operationelle Grenzschicht-Messprogramme begonnen (vgl. z. B. LEMONE et al. 2000). Trotzdem spielen Feldexperimente nach wie vor eine herausragende Rolle in der wissenschaftlichen Forschung zur Untersuchung spezifischer Fragestellungen im Rahmen von Prozessstudien. Feldexperimente erlauben

- die Konzentration der technischen und wissenschaftlichen Kapazitäten zahlreicher Institutionen und Forschergruppen über einen begrenzten Zeitraum in einem zielorientiert definierten Messgebiet,
- die zeitweise Errichtung zusätzlicher Messstandorte zur Verdichtung und/oder Erweiterung bestehender Messnetze,
- die Aufzeichnung und detaillierte Analyse zeitlich hochaufgelöster (Roh-)Datensätze,
- den Einsatz aufwändiger, (noch) nicht für einen Dauerbetrieb geeigneter Messverfahren oder Geräteträger (Flugzeuge oder Hubschrauber, Fesselballonsondierungen, verschiedene Lidar-Systeme).

Dementsprechend wurde am MOL bereits bei der Konzipierung des Forschungsprogramms zu Landoberflächen- und Grenzschichtprozessen auf die Kombination von Dauermessungen mit zeitlich begrenzten Messkampagnen orientiert. In den letzten zehn Jahren sind auf dem GM Falkenberg und im LITFASS-Gebiet eine Reihe von Feldexperimenten zur Standortcharakterisierung, zur Erprobung von Messsystemen sowie in Verbindung mit den Zielen des LITFASS-Projektes und nationaler Forschungsprogramme durchgeführt worden. Einen Überblick über diese z. T. mit breiter nationaler und internationaler Beteiligung am oder unter Mitwirkung des MOL realisierten Grenzschichtexperimente gibt Tab. 6-1.

Einen Höhepunkt der experimentellen Studien bildete das Feldexperiment LITFASS-2003 (BEYRICH 2004). Es fand im Rahmen des Forschungsprojektes EVA_GRIPS (Evaporation at Grid / Pixel Scale) im Mai / Juni 2003 statt, den Schwerpunkt bildete die Bestimmung der flächengemittelten Energie- und Wasserdampfflüsse im LITFASS-Gebiet. Eingebunden in das operationelle Messprogramm des MOL wurden während LITFASS-2003 durchgeführt

- mikrometeorologische- und Turbulenzmessungen an 13 Standorten über verschiedenen Landnutzungen (Wald, Wasser, Grasland, Getreide-, Raps- und Maisfelder),
- Vertikalsondierungen mit kombinierten Lidar-/RASS- bzw. Lidar-/Lidar-Messsystemen,
- mehr als 20 Messflüge mit der Hubschrauberschleppsonde Helipod,
- Large-Aperture Scintillometer-Messungen über drei Messpfade von 3,2, 4,7 und 10 km Länge über unterschiedlichen Unterlagen (Wald, Agrarland, gemischte Landnutzung) und zusätzlich Mikrowellen-Scintillationsmessungen zwischen dem GM Falkenberg und dem MOL (4,7 km Messpfad).

Aus den Messwerten der Bodenstationen wurde unter Berücksichtigung der Standortbedingungen an den einzelnen Messstellen sowie der Datenqualität der einzelnen Datensätze für jede Landnutzungsform eine synthetische Zeitreihe der turbulenten Flüsse (*Flux Composite*) ermittelt und hieraus unter Berücksichtigung der Anteile der verschiedenen Landnutzungstypen an der Gesamtfläche ein Flächenmittel der turbulenten Flüsse von fühlbarer und latenter Wärme bestimmt. Die abgeleiteten Werte wurden dann verglichen mit den flächengemittelten Flüssen aus Helipod-, Scintillometer- und Lidar-Messungen sowohl für das Gesamtgebiet als auch für die drei Hauptlandnutzungstypen Wald, Agrarland und Wasser getrennt. In Abb. 6-9 sind exemplarisch die Ergebnisse für einen Messtag dargestellt. Dabei ist erkennbar, dass für den fühlbaren Wärmefluss die aus den Bodenmessungen abgeleiteten flächenmittleren Flüsse innerhalb der Fehlergrenzen sehr gut mit den Werten der räumlich integrierenden Messverfahren übereinstimmen, für den latenten Wärmefluss sind größere, z. T. systematische Abweichungen festzustellen, deren Ursachen neben messtechnischen Problemen vor allem in der heterogenen Struktur des Feuchtefeldes und der Dominanz größerer Skalen im vertikalen Feuchtetransport gesehen werden.

Das Beispiel aus dem LITFASS-2003 Experiment illustriert, wie durch die Synergie verschiedener Messsysteme konsistente Datensätze zu Grenzschichtparametern abgeleitet werden können. Mit den am MOL

Name	Zeitraum	teiln. Gruppen	Schwerpunkt	Referenz
LINEX-96/2	Jun 1996	4	Charakterisierung GM Falkenberg Erprobung Turbulenzmesstechnik	Foken (Hrsg.), 1997: *DWD Offenbach – Arbeitsergebnisse FE* **No. 48**.
LINEX-97/1	Jun 1997	4	Erprobung Messsysteme und Messstrategie für LITFASS-98	Foken (Hrsg.), 1998: *DWD Offenbach – Arbeitsergebnisse FE* **No. 53**.
LITFASS-98	Mai/Jun 1998	15	Turbulente Flüsse über einer heterogenen Landschaft und ihre Kopplung mit Strahlungs- und Bewölkungsprozessen	Beyrich (Hrsg.), 2000: *DWD Offenbach – Arbeitsergebnisse FE* **No. 62**, Beyrich et al. (Hrsg.), 2002: *Theor. Appl. Climatol.* **73**, 1-2, 105 S.
LINEX-2000	Aug/Sep 2000	4	Variabilität der Struktur der unteren AGS im LITFASS-Gebiet Turbulente Flüsse aus Sodar-Messungen	Engelbart et al., 2002: *Proc. 11th Int. Symp. Acoustic Remote Sensing*, 338-341.
STINHO-2	Jul 2002	5	Turbulenter Austausch über inhomogener Unterlage auf der Mikro-α Skala	Raabe et al.: *Meteorol. Z. (N.F.)* – im Druck
LITFASS-2003	Mai/Jun 2003	15	Verdunstung über einer heterogenen Landoberfläche, Flächenmittelungsstrategien für turbulente Flüsse	Beyrich (Hrsg.), 2004: *DWD Offenbach – Arbeitsergebnisse FE* **No. 79**, 100 S.

Tab. 6-1: Grenzschichtexperimente am Meteorologischen Observatorium Lindenberg im Zeitraum 1995-2004.

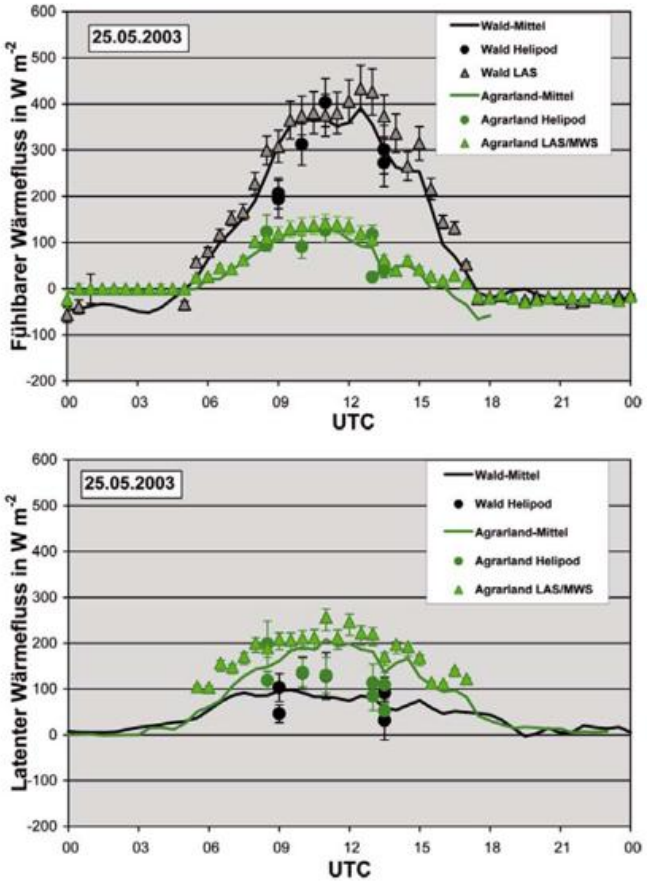


Abb. 6-9: Tagesgang von fühlbarem (oben) und latentem (unten) Wärmefluss als Flächenmittel über Wald bzw. Agrarland aus Messungen an Bodenstationen, mittels Scintillometer und mit der Hubschrauber-Schleppsonde Helipod am 25.5.2003.

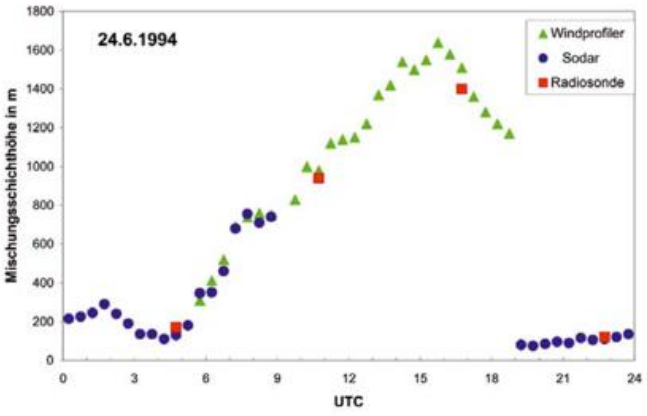


Abb. 6-10: Tagesgang der Grenzschichthöhe am 24.6.1994, abgeleitet aus Sodar-, Windprofiler- und Radiosondenmessungen.

im Dauerbetrieb befindlichen Systemen ist die Konstruktion solcher „*Composites*" auch für die Profile mittlerer Größen sowie für integrale Grenzschichtparameter möglich. Mast-, Sodar- und Windprofiler-Messungen sowie Radiosondierungen können wegen ihrer spezifischen Geräte- und Betriebseigenschaften jeweils für sich genommen keine entsprechenden Datensätze für die gesamte AGS in hoher zeitlicher und vertikaler Auflösung liefern, aus der Zusammenführung der Messungen mit diesen Systemen können jedoch konsistente Profile von Wind und Temperatur oder der komplette Tagesgang der Grenzschichthöhe bereitgestellt werden. Für den Tagesgang der Grenzschichthöhe ist dies an einem Beispiel in Abb. 6-10 gezeigt.

6 Qualitätssicherung

Die Gewährleistung und Kontrolle einer definierten und hohen Qualität der Daten stellt im Hinblick auf deren Nutzung in der Wettervorhersage und Klimaforschung eine Grundforderung an das Messprogramm eines meteorologischen Observatoriums dar. Umfangreiche Maßnahmen zur Qualitätssicherung und Qualitätskontrolle (**Q**uality **A**ssurance/**Q**uality **C**ontrol – QA/QC) bilden einen komplexen, mehrstufigen Prozess, der weit über die Prüfung der gewonnenen Daten hinausgeht. Bezogen auf das Grenzschichtmessprogramm am MOL können folgende wesentliche Elemente der QA/QC genannt werden:

- sorgfältige Auswahl und umfassende Charakterisierung der Messstandorte und der eingesetzten Mess- und Sensorsysteme,
- kontinuierliche Überwachung des Messbetriebes und zeitnahe Lösung von technischen Problemen, Führung von Messprotokollen bzw. -tagebüchern (in elektronischer Form),
- regelmäßige Pflege und Wartung der eingesetzten Messsysteme und Sensoren einschließlich wiederholter Kalibrierungen nach festgelegten Plänen,
- Transfer, Sicherung und Archivierung der originären Messdaten,
- Kontrolle und Prüfung der Messdaten auf interne Plausibilität und Konsistenz mit anderen Daten unter Berücksichtigung physikalisch begründeter Zusammenhänge,
- Abspeicherung der ggf. korrigierten und qualitätskontrollierten Daten mit einem dazugehörigen Qualitätskennzeichen in der Datenbank des MOL.

Bei der Auswahl und Charakterisierung von Messstandorten für mikrometeorologische Messungen sind allgemein höhere Maßstäbe anzulegen als für meteorologische Standardmessungen. Neben der Repräsentativität, Oberflächenbeschaffenheit und Hindernisfreiheit ist insbesondere sicherzustellen, dass die durch die Turbulenzmesssysteme erfassten Signale weitgehend von der zu untersuchenden Oberfläche geprägt sind und die Messungen unterhalb potentieller interner Grenzschichten, die an den Grenzen zu in ihren thermischen oder dynamischen Eigenschaften abweichenden Nachbarflächen entstehen können, durchgeführt werden. Für das GM Falkenberg sind Untersuchungen zum Auftreten interner Grenzschichten vor Beginn der Geräteinstallation im Rahmen der Feldexperimente LINEX-96/2 und LINEX-97/1 durchgeführt worden. Es konnte gezeigt werden, dass für die Positionen des kleinen Profilmastes und der Turbulenzmesskomplexe im jeweils die Wiese des Messfeldes

umfassenden Anströmsektor unterhalb von etwa 3,5 m Messhöhe keine Störungen durch interne Grenzschichten zu erwarten sind. Eine Analyse der Quellgebietsflächen (sogenannte „Footprints") für die turbulenten Flussmessungen hat darüber hinaus gezeigt, dass für die genannten Sektoren bei neutraler und labiler Schichtung jeweils mehr als 90 % des Messsignals von der Wiese des Messfeldes stammen. Bei stabiler Schichtung reduziert sich dieser Wert auf etwa 75 %, wobei dann die Flüsse in ihren Beträgen in der Regel klein und die Differenzen zu den ebenfalls landwirtschaftlich genutzten Nachbarflächen nur gering sind.

Während Messungen in Bodennähe in der Regel nur durch die unmittelbar umliegenden Unterlagen beeinflusst werden, können bei größeren Messhöhen Beiträge zum Messsignal von bis zu einigen km entfernt liegenden Quellflächen nachgewiesen werden. Dies wurde z. B. während des Experimentes LITFASS-1998 eindrucksvoll gezeigt (vgl. BEYRICH et al. 2002), wo am 99m-Mast in Falkenberg entgegen dem üblichen Verständnis der Grenzschichtprozesse eine Zunahme des Impulsflusses mit der Höhe festgestellt werden konnte. Als Ursache hierfür wurde die unterschiedliche Rauhigkeit im Footprint-Bereich einzelner Messhöhen nachgewiesen. Für den Zeitraum des LITFASS-2003 Experimentes wurde für alle mikrometeorologischen Messstationen eine Footprint-Klimatologie erstellt. Abb. 6-11 zeigt in einem Beispiel die Größe des akkumulierten Quellgebietes für die Turbulenzmessungen an der Waldstation Forst Kehrigk. Es ist ersichtlich, dass an diesem Standort unabhängig von den Stabilitätsverhältnissen das Messsignal praktisch ausschließlich von den umliegenden Waldflächen geprägt wird.

Ein weiteres Problem der Standortcharakterisierung stellt die kleinskalige, lokale Heterogenität einer Messfläche dar, insbesondere in Bezug auf die Bodeneigenschaften ist diese besonders ausgeprägt. Auf dem GM Falkenberg werden deshalb alle oberflächenahen Bodenmessungen in der Regel mindestens dreifach durchgeführt, um durch Mittelwertbildung eine größere Repräsentativität zu erreichen und die Abweichungen der Einzelmessungen untereinander in die Bewertung der Datenqualität einfließen lassen zu können.

Einen Schwerpunkt von Arbeiten zur Qualitätssicherung mikrometeorologischer Messungen am MOL bilden Messprogramme zur Charakterisierung von Sensoren und Sensorvergleiche. Mehrfach wurden in Lindenberg Vergleichsexperimente von Turbulenzsensorik im Rahmen nationaler Messkampagnen durchgeführt (z. B. BEYRICH et al. 2002). Dabei wurde u. a. gezeigt, dass mit Sensoren gleichen Typs und unter gleichen Messbedingungen Abweichungen der turbulenten Flüsse von weniger als 5 % für den fühlbaren Wärmefluss und von weniger als 10 % für die Flüsse von Impuls und latenter Wärme erreicht werden können, dass jedoch die Verwendung verschiedener Sensortypen ebenso wie Unterschiede in der zur Datenbearbeitung genutzten Software Differenzen von bis zu 20 % hervorrufen können.

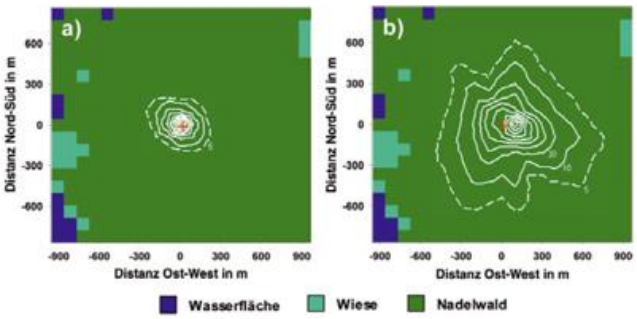


Abb. 6-11: Ergebnisse einer Footprintanalyse für die turbulenten Flussmessungen am Standort der Waldstation Forst Kehrigk (Messstelle 3 in Abb. 6-7) im Zeitraum des LITFASS-2003 Experimentes: Lage der akkumulierten Quellgebiete für a) labile und b) stabile Schichtungsverhältnisse.

Eine wichtige Stufe im Prozess der QA/QC stellt schließlich die Prüfung der Messdaten dar. Dies umfasst die Kontrolle auf das Einhalten physikalisch bzw. klimatologisch sinnvoller Messbereiche, Vergleiche zwischen unabhängigen Messwerten ein und desselben Parameters und die Prüfung physikalischer Zusammenhänge (z. B. Vergleich von reflektierter und einfallender kurzwelliger Strahlung, Vergleich der Vorzeichen von vertikalen Gradienten und zugehörigen Flüssen, Kontrolle der Summe der turbulenten Flüsse gegen die verfügbare Energie etc.). Mit dem Ziel einer weitgehend physikalisch basierten Datenprüfung ebenso wie im Hinblick auf die Reduktion von Lücken in den Datenreihen wurde bei der Konzipierung des Messprogramms am MOL Wert darauf gelegt, möglichst viele Parameter mit zwei (wenn möglich auf unterschiedlichen Messprinzipien basierenden) verschiedenen Messverfahren bzw. Sensoren zu erfassen. Für komplexe mikrometeorologische Messungen, insbesondere für Flussmessungen nach der Eddy-Kovarianz-Methode fehlten anerkannte Kriterien zur Bewertung der Datenqualität bis vor zehn Jahren nahezu völlig, bis etwa zeitgleich zu Arbeiten in den USA von FOKEN und WICHURA (1996, vgl. FOKEN 2003) basierend auf in Lindenberg durchgeführten Untersuchungen Testverfahren zur Charakterisierung der Datenqualität von Turbulenzmessungen vorgestellt wurden, die inzwischen verbreitet bei der Qualitätskontrolle von Messungen turbulenter Flüsse eingesetzt werden.

7 Datennutzer und Einbindung in Internationale Programme

Der Beginn eines operationellen mikrometeorologischen- und Grenzschicht-Messprogramms am MOL begründete sich aus den Forderungen nach der Verfügbarkeit von Langzeit-Datensätzen zur Charakteri-

sierung von Wechselwirkungsprozessen zwischen Atmosphäre und Unterlage unter besonderer Berücksichtigung der Heterogenität der Landoberfläche im Hinblick auf die Entwicklung und den Test entsprechender Parameterisierungsschemata in den Modellen der NWV. Gegenwärtig werden die Messdaten vom GM Falkenberg im Rahmen der Überwachung der Vorhersagen des Lokalmodells des DWD regelmäßig mit den Modellergebnissen für den Gitterpunkt Lindenberg verglichen, ausgewählte Resultate dieser Vergleiche werden im „*Quarterly Report of the German NWP System*" publiziert. Datensätze des Grenzschichtmessprogramms am MOL werden darüber hinaus genutzt zur Entwicklung und Erprobung neuer Parametrisierungsansätze für die NWV-Modelle des DWD, aktuelle Beispiele sind u. a. die Modifikation des Bodenmodells TERRA sowie der Test eines einfachen Schemas zur Parameterisierung der turbulenten Flüsse über Wasserflächen.

Zugleich stellen die am MOL gewonnenen Datensätze zu Landoberflächen- und Grenzschichtprozessen in ihrer Verbindung mit den auf der Basis des komplexen, operationellen Langzeitmessprogramms gewonnenen Datensätzen zur physikalischen Struktur der Atmosphäre („Lindenberger Säule") ein für die Klimaüberwachung und -diagnose äußerst wertvolles Datenmaterial dar und werden zunehmend für eine wissenschaftliche Nutzung im Rahmen der Daseinsvorsorge sowie von nationalen wie internationalen Projekten und Programmen angefragt. Hierzu zählen u. a. das internationale Ostseeprojekt BALTEX und die ***Co-ordinated Enhanced Observation Period*** (CEOP) als Beiträge zum ***Global Energy and Water Cycle Experiment*** (GEWEX) des Weltklimaforschungsprogramms der WMO. Lindenberg wurde für CEOP als eine von derzeit vier europäischen Referenzstationen nominiert. Wissenschaftler des MOL haben an der Ausarbeitung von Festlegungen zu Datenumfang, Datenformaten und Regularien des Datenaustausches für das globale Netz der Referenzstationen mitgewirkt, Datensätze zur Charakterisierung von Grenzschicht- und Landoberflächenprozessen werden regelmäßig an das CEOP *Central Data Archive* in Boulder übermittelt.

Literatur

ALBRECHT, F., 1940: Untersuchungen über den Wärmehaushalt der Erdoberfläche in verschiedenen Klimagebieten. Reichsamt Wetterdienst: *Wiss. Abh. Bd. VIII*, Nr. **2**, 1-82.

ARYA, S. P., 2001: Introduction to Micrometeorology (2nd Ed.). San Diego – London: *Academic Press*, 420 S.

BARKOW, E. , 1914: Vorläufiger Bericht über die meteorologischen Beobachtungen der Deutschen Antarktisexpedition 1911–1912. *Meteorol. Z.* **49**, 120-126.

BEYRICH, F. (Hrsg.), 2001: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Projekt LITFASS **L**indenberg **I**nhomogeneous **T**errain – **F**luxes between **A**tmosphere and **S**urface a long-term **S**tudy. *DWD – Forschung und Entwicklung: Arbeitsergebnisse* Nr. **70**, 70 S.

BEYRICH, F. (Hrsg.), 2004: Verdunstung über einer heterogenen Landoberfläche: Das LITFASS-2003 Experiment – Ein Bericht. *DWD – Forschung und Entwicklung: Arbeitsergebnisse*, Nr. **79**, 100 S.

BEYRICH, F., T. FOKEN, H.-J. HERZOG (Hrsg.), 2002: The LITFASS-98 Experiment. *Theor. Appl. Climatol.* **73**, 1-2, 105 S.

DUBOIS, P., 1993: Das Observatorium Lindenberg in seinen ersten 50 Jahren: 1905–1955. Offenbach: *Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes: Geschichte der Meteorologie in Deutschland* Bd. **1**, 375 S.

FOKEN, T., 2003: Angewandte Meteorologie – Mikrometeorologische Methoden. Berlin – Heidelberg – New York: *Springer*, 289 S.

GARRATT, J. R., 1992: The Atmospheric Boundary Layer. Cambridge: *University Press*, 316 S.

GEIGER, H. (Hrsg.), 1927: Das Klima der bodennahen Luftschicht. *Friedr. Vieweg und Sohn*, Braunschweig, 246 S.

HERZOG, H.-J., U. SCHUBERT, G. VOGEL, A. FIEDLER, R. KIRCHNER, 2002: LLM – the high-resolving nonhydrostatic simulation model in the DWD – project LITFASS Part I, Modelling technique and simulation method. *DWD – Forschung und Entwicklung: Arbeitsergebnisse* Nr. **67**, 75 S.

KÖRBER, H.-G., 1993: Die Geschichte des Meteorologischen Observatoriums Potsdam. Offenbach: *Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes: Geschichte der Meteorologie in Deutschland* Bd. **2**, 129 S.

LEMONE, M. A. and 13 co-authors, 2000: Land – atmosphere interaction research – early results and opportunities in the Walnut river watershed in southeast Kansas: CASES and ABLE. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* **81**, 757-779.

LETTAU, H. H., B. DAVIDSON, 1957: Exploring the Atmopsheres First Mile. London – New York – Paris: *Pergamon Press*, 578 S. (2 Bände).

MÜLLER, E., T. FOKEN, E. HEISE, D. MAJEWSKI, 1995: ‚LITFASS' – a nucleus for a BALTEX field experiment. *DWD – Forschung und Entwicklung: Arbeitsergebnisse* Nr. **33**, 17 S. + Anl.

NEISSER, J., W. ADAM, F. BEYRICH, U. LEITERER, H. STEINHAGEN, 2002: Atmospheric boundary layer monitoring at the Meteorological Observatory Lindenberg as a part of the „Lindenberg Column": Facilities and selected results. *Meteorol. Z. (N.F.)* **11**, 241-253.

RINK, J., 1953: Über das Verhalten des mittleren vertikalen Temperaturgradienten der bodennahen Luftschicht (1 bis 76 m) und seine Abhängigkeit von speziellen Witterungsfaktoren und Wetterlagen. Untersuchungen mittels einer Seilaufzugsvorrichtung an den Funktürmen beim Aerologischen Observatorium Lindenberg. Jahr 1950/51. *Abh. des Meteorol. Hydrol. Dienstes der DDR*, Nr. **18** (Band III).

SCHNEIDER-CARIUS, K., 1953: Die Grundschicht der Troposphäre. Leipzig: *Geest & Portig*, 168 S.

SKEIB, G., 1980: Zur Definition universeller Funktionen für die Gradienten von Windgeschwindigkeit und Temperatur in der bodennahen Luftschicht. *Z. Meteorol.* **30** , 23-32.

STULL, R.B., 1988: An Introduction to Boundary-Layer Meteorology. Dordrecht – Boston – London: *Kluwer Acad. Publ.*, 670 S.

promet, Jahrg. 31, Nr. 2–4, 159-170 (Oktober 2005)
© Deutscher Wetterdienst 2005

W. K. ADAM, H. DIER

7 Lange Messreihen zur Wetter- und Klimaforschung am Meteorologischen Observatorium Lindenberg

Long-time series of measurements for weather- and climate research at the Meteorological Observatory Lindenberg

Zusammenfassung
Homogene lange Klimareihen erlangen angesichts der globalen Klimaproblematik immer stärkere gesellschaftspolitische Bedeutung. Es werden die Temperatur- und die Niederschlagsreihe als Beispiel langjähriger Messungen der Klimastation des Observatoriums Lindenberg seit 1905 dargestellt. Schwerpunkt dieses Beitrages ist der Versuch einer Darstellung der aerologischen Messungen, die seit Gründung des Observatoriums 1905 regelmäßig in Lindenberg durchgeführt wurden. Dabei werden vorrangig Temperatur- und Feuchtemessungen in der freien Atmosphäre an ausgewählten Druckstufen (Hauptdruckflächen 850, 700, 300 und 100 hPa) dargestellt, ohne dass das Problem möglicher systematischer Fehler bedingt durch Sensorwechsel und Korrekturverfahren abschließend geklärt werden konnte. Weitere Untersuchungen zur Homogenisierung der Datenreihen müssen folgen. Im Beitrag wird ein erstes Verfahren zur Homogenisierung für den Messparameter Luftfeuchte erläutert. Anschließend wird die lange Reihe der Ozonprofilmessung am Observatorium vorgestellt. Die Änderung der Konzentration des Ozons, eines der wichtigsten klimarelevanten Spurenstoffe, wird beispielhaft an der Grundschicht und der Ozonschicht gezeigt.

Abstract
Given the global climate alterations and atmospheric changes, a homogeneous long time series of climate measurements gains more socio-political importance.Temperature and precipitation series for the Lindenberg Observatory started in 1905 will be displayed as an example of a long time measurement series.The main focus of this article is an attempt to illustrate the aerological measurements which have been continuously carried out since the foundation of the Lindenberg Observatory in 1905.Therefore, mainly temperature and humidity measurements in free atmosphere at specific pressure levels will be displayed (standard pressure levels 850, 700, 300, 100 hPa) without resolving the issue of possible systematic errors due to change of sensors and methods of correction procedures. Further investigations are required in respect to homogenisation of these measurement series. A first approach to homogenise humidity will be introduced.After this, long time series of ozone profile measurements at Lindenberg Observatory will be introduced. Change in ozone concentration – one of the most relevant green house gases – will be illustrated as an example using boundary layer and ozone layer.

1 Einleitung

1.1 Datenbank „Lindenberger Säule“

Die wachsende Integration des Meteorologischen Observatoriums Lindenberg (MOL) als Referenzstation in nationale und internationale Programme und das Interesse von DWD-internen, nationalen und internationalen Kooperationspartnern an Lindenberger Daten erforderte den Aufbau einer leistungsstarken Datenbank. Nur eine Datenbank, welche alle Messdaten des Observatoriums effizient verwaltet, kann diesen Anforderungen gerecht werden (s. Kap. 8).

Mit der Neuausrichtung des Observatoriums nach der Wiedervereinigung und der Eingliederung in den Deutschen Wetterdienst (DWD) war eine stärkere Orientierung auf die Durchführung von Messkampagnen und den Langzeiteinsatz von experimenteller Messtechnik erforderlich (s. Kap. 1). Dies erforderte einen verstärkten Messdatenaustausch innerhalb des Observatoriums zwischen den einzelnen Dezernaten. Durch die Datenbank wurde eine einheitliche, jederzeit verfügbare und einfache Schnittstelle des Datenaustausches geschaffen. Der Aufbau einer Datenbank erfolgte schon 1995 mit der Installation eines ORACLE-Datenbankbetriebssystems (Version 7.3) auf einer der ersten Workstations. Alle am Observatorium erfassten meteorologisch relevanten Messparameter sind in dieser Datenbank enthalten, wobei der kleinste Mittelungszeitraum mit ≥10 min festgelegt wurde. Wegen der damaligen Einschränkungen bezüglich des verfügbaren Speicherplatzes war vorgesehen, keine zeitlich höher aufgelösten Messparameter (Rohdaten) in der Datenbank zu speichern.

Inzwischen wird eine ORACLE 9i2-Datenbank mit einem wesentlich erweiterten NAS-Rechner als Speicherungsmedium (FAS 920) und einem leistungsstarken Datenbankserver (Compaq ProLiant 580) benutzt. Aufgrund der gestiegenen Anzahl von Daten und Nutzern sowie spezielleren Nutzeranforderungen ist auch zusätzlicher Personalaufwand für die Erweiterung und Verwaltung der Datenbank erforderlich.

Nachdem in den ersten Jahren der Aufbau der Strukturen innerhalb der Datenbank der Schwerpunkt war, übernimmt nunmehr die Qualitätsprüfung der auf der Datenbank zu speichernden Messdaten eine zentrale Rolle. Alle Messdaten, die in der Datenbank gespei-

chert sind, durchlaufen eine oder mehrere Prüfroutinen (z. B. Quicklook, Schwellwertüberprüfung und/oder Signifikanztest). Ergebnis der Prüfungen sind Qualitätsmerkmale, die jedem Messwert bzw. jedem Messdatensatz zugeordnet werden. Erst danach erfolgt die Einspeisung der Messdaten in die Datenbank. Zunehmend werden Routinen zur Visualisierung und zur Korrektur der bereits in der Datenbank gespeicherten Daten entwickelt. Mittels dieser Routinen ist der Vergleich der eigenen Messdaten mit Messdaten anderer Messkomplexe oder abgeleiteten Parametern rasch und zuverlässig möglich.

Die wesentlichsten Aufgaben der Datenbank „Lindenberger Säule" sind:
- Bereitstellung spezieller Messdaten für die numerische Vorhersage (NWV),
- Bereitstellung spezieller Messdatensätze für die meteorologische Forschung,
- Lieferung von meteorologischen Informationen und Messdaten für Messkampagnen,
- Bereitstellung komplexer Datensätze innerhalb internationaler Programme und Projekte (z. B. CEOP, BSRN, WOUDC),
- Generierung langer homogener Messreihen ausgewählter meteorologischer Parameter zur Klimaforschung.

Neben der Speicherung der aktuellen Messdaten der verschiedenen Messkomplexe des Observatoriums wurde im vergangenen Jahr mit der Aufbereitung der historischen Messdaten des Observatoriums (Klima und Aerologie) ab 1905 und deren Speicherung in der Datenbank begonnen. Die Originaldaten wurden z. T. den entsprechenden Daten- sowie Ergebnisbänden des Königlich Preußischen, ab 1919 Preußischen Aeronautischen Observatoriums Lindenberg (s. Literaturliste) entnommen.

Die Abb. 7-1 gibt einen Überblick über die Struktur, die Messkomplexe und die in der Datenbank gespeicherten Daten. Der Messkomplex „Synoptisch-aerologische Station" beinhaltet alle an der Wetterstation des Observatoriums gewonnenen Messdaten. Dies sind vor allem terminliche Klimawerte ab 1905 sowie ab 1997 der klimatologische 10-Minuten-Datensatz. Weiterhin sind die aerologischen Messungen des Observatoriums seit 1905 mit den später noch zu erwähnenden Datenlücken hier abgespeichert. Innerhalb dieses Datenbankbereiches werden auch die Profile der Ozonsondierungen seit 1975 aufbewahrt. Im Bereich „Bodengebundene Fernsondierung" werden die Temperatur- und Windprofile der beiden Windprofiler (Grenzschicht und Troposphäre) des Observatoriums seit 1997 (s. Kap. 5) mit einer zeitlichen Auflösung von 30 min verwaltet. Die Profile des SODAR auf dem **G**renzschicht**m**essfeld Falkenberg (GM) werden seit 1998 mit einer zeitlichen Auflösung von 15 min in der Datenbank geführt. Mit dem geplanten Aufbau einer GVaP-Referenzstation und der Umsetzung der Arbeitsgruppe „passive Fernerkundung" von Potsdam nach Lindenberg sind seit 1999 auch Wasserdampfsäulendicken bzw. -profile, die durch indirekte Methoden (Mikrowellenradiometer, -profiler bzw. GPS) bestimmt wurden, in der Datenbank gespeichert.

Abb. 7-1: Struktur der Datenbank „Lindenberger Säule" (Stand: Januar 2005).

Alle auf dem Grenzschichtmessfeld Falkenberg gewonnenen Messdaten werden in der Datenbank im Messkomplex „Grenzschichtmessfeld" gespeichert. Hier sind die Temperatur-, Feuchte- und Windprofile der beiden Masten (12 und 99 m) verfügbar. Aus den Profildaten des 12-m-Mastes werden kontinuierlich turbulente Flüsse bestimmt. Seit 2000 erfolgt die Messung der turbulenten Flüsse am Boden mittels direkter Flussmesstechnik. Darüber hinaus beinhaltet dieser Messkomplex die auf dem Bodenmessfeld in Falkenberg gewonnenen Temperatur- und Feuchteprofile des Erdbodens, den Bodenwärmefluss sowie die langwelligen und kurzwelligen Strahlungskomponenten. Zur Vergleichbarkeit mit den meteorologischen Standardparametern an anderen Standorten wurden auch die synoptischen Daten einer automatischen Wetterstation (MILOS 500) in diesen Komplex integriert.Alle Messdaten der engmaschigen Messnetze (Energiebilanz, Niederschlag und Strahlung), die im Rahmen des Projektes „LITFASS" für den Gitterpunkt Lindenberg aufgebaut wurden, werden im Messkomplex „Flächenmessnetze" verwaltet (s. Kap. 6). Mit Inbetriebnahme der Strahlungszentrale und seiner Messplattform werden alle integralen und spektralen Strahlungsflussmessungen im Messkomplex „Strahlungszentrale" gespeichert (s. Kap. 3). Dies betrifft sowohl die integralen Strahlungsdaten der BSRN-Station als auch die spektralen Messungen zur Bestimmung der optischen Dicke des Aerosols, des Gesamtozongehaltes und anderer optisch gemessener Spurenstoffe. Für einen Teil der Daten existieren schon längere Reihen (z. B. Aerosol ab 1986, BSRN ab 1994), die im Rahmen eines speziellen Observatoriumsprogramms schon vor dem Aufbau der Strahlungszentrale (s. Kap.1) in Lindenberg erfasst wurden. Alle Daten, die Verfahren, Methoden und Systembeschreibungen enthalten, werden im Komplex „Metadaten" verwaltet.

Die Messkomplexe werden in der Datenbank in logischen Speicherstrukturen (tablespace) verwaltet. Diese sind wiederum in Tabellen strukturiert. Jede Tabelle enthält eine Anzahl von Spalten. In einer oder mehreren Spalten sind dann unsere meteorologischen Messwerte abgelegt. Die permanente Pflege der Datenbank ist eine wichtige Voraussetzung insbesondere in der Funktion des MOL als Referenzstation in nationalen und internationalen Kampagnen und Programmen (s. Kap. 1 und 8).

1.2 Lage der Station

Der Ort Lindenberg liegt etwa 50 km südöstlich vom Stadtrand Berlin an der Bundesstraße 246 zwischen Storkow und Beeskow. Das Observatorium und die Wetterstation befinden sich nördlich des Ortes Lindenberg, eines Ortsteiles der Gemeinde Tauche, an der Südwestseite der bis 122 m über NN aufragenden und teilweise bewaldeten Kalkberge in einer Höhe von 98 m (Wetterstation) über dem Meeresspiegel (φ = 52° 13' N, λ = 14° 7' E), siehe auch Abb. 6-7. Das Gelände in der unmittelbaren Umgebung ist nach Südwesten flach mit mäßig geneigten Anteilen. Es steigt nach Norden und Osten an und ist im Süden und Westen offen. Bei einer mittleren Höhenlage der Umgebung von etwa 80 m und einer Höhenvariation von 40 bis 130 m über NN ist die Gegend durch Platten, Hügel und Niederungen gekennzeichnet. Die welligen Platten liegen um 80 bis 90 m über NN und steigen nach Norden an. Sie werden durch Hügel (meist Endmoränen) mit Höhen um 120 m über NN überragt. Nach Süden und Westen fällt das Gelände allgemein ab. Die Niederungen im Westen (um den Scharmützelsee), im Süden (Kossenblatter Seen und Spreeniederung) und im Osten (Spreeniederung) liegen um 40 m über NN. Lindenberg liegt im küstenfernen Bereich des Binnentieflandes mit überwiegend kontinentalem Einfluss.

2 Bodennahe Klimadaten

2.1 Historie

Ab 1905 existieren Klimadaten aus den 3-terminigen Klimabeobachtungen, die bisher teilweise aufbereitet werden konnten, s. ADAM et al. (1997). Im Jahre 1967 erfolgte die Umstellung auf die 8-terminige Klimabeobachtung. Nach der Eingliederung des **M**eteorologischen **D**ienstes (MD) in den Deutschen Wetterdienst erfolgte die Aufbereitung der Klimawerte wieder aus den 3-terminigen Beobachtungen. Seit April 2001 werden die Klimawerte aus den 24-stündlichen Beobachtungen berechnet.

Die Erstausstattung des Observatoriums bezüglich der Messung von bodennahen Klimadaten bestand im Jahre 1905 aus folgenden Instrumenten:

Luftdruck	- Gefäßbarometer von FUESS
	- Quecksilberbarograph nach REDIER
	- Aneoridbarograph nach RICHARD
rel. Luftfeuchte	- Aspirationspsychrometer nach ASSMANN
	- KOPPEsche Haarhygrometer
Wind	- Anemograph SPRUNG-FUESS
	- mehrere Anemometer nach ASSMANN, FUESS oder MARVIN
Niederschlag	- HELLMANNsche Regenmesser
	- HELLMANNscher Ombrograph von FUESS
Lufttemperatur	- mehrere Quecksilber- und Weingeistthermometer vorrangig von FUESS
Strahlung	- Sonnenscheinautograph CAMPBELL-STOKES von FUESS
	- Pyrheliometer nach ÅNGSTRÖM

Über den Zeitpunkt des Ersatzes dieser Erstausstattung ist wenig bekannt. Für die Zeit ab 1946 existiert ein Gerätenachweis der Wetterstation (Tab. 7-1).

meteorologischer Parameter	Messgerät	Zeitraum von	bis
Luftdruck	Stationsbarometer	01.01.1946	
	Digitalbarometer (AIR)	30.09.1992	
relative Luftfeuchte	Hygrometer	01.01.1946	
	ROTRONIK	30.09.1992	
Wind	FUESS 82.A	01.01.1946	05.10.1971
	JUNKALOR, ZWG	05.10.1971	28.09.1992
	WMG-201	30.09.1992	
Niederschlag	HELLMANN 200 cm²	01.01.1946	
	M 180-2	27.05.1977	09.02.1990
	NG-200	10.02.1990	
Lufttemperatur	Hütten-Thermometer (Strahlungshütte Holz)	01.01.1946	30.11.1980
	Hütten-Thermometer (Strahlungshütte Plastik)	30.11.1980	
	Pt-100	28.11.1976	
Strahlung	Sonnenscheinautograph CAMPBELL-STOKES	01.01.1946	01.04.1993
	SONI e	30.09.1992	
	Pyranometer	28.11.1976	
	Pyranometer m. Schattenring	28.11.1976	

Tab. 7-1: Gerätenachweis Wetterstation.

Bis 1956 befanden sich die Wetterhütte und die Niederschlagsmessgeräte unterhalb der ehemaligen Gasometeranlage an der Nordwestseite der Kalkberge. Danach wurde das Messfeld etwa 100 m westlich des Haupteinganges angelegt. 1971 erfolgte eine weitere Verlegung zum jetzigen Standort neben dem Haupteingang. Die Umsetzung der Station erfolgte aus administrativen Gründen, ein Einfluss auf die untersuchten Messdaten konnte nicht festgestellt werden. Es existieren keine charakteristischen Unterschiede zwischen den Standorten.

2.2 Aufbereitung langer Messreihen

Im letzten Jahr wurden verstärkt historische Klimawerte der Wetterstation digital erfasst und auf elektronischen Datenträgern gespeichert. Diese Daten wurden in die Datenbank „Lindenberger Säule“ geladen. Die Erfassung der 3-terminigen Klimareihe mit den meteorologischen Parametern Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Wind, Luftdruck und den täglichen Niederschlagssummen wurde durch die Mitarbeiter der Wetterstation durchgeführt. Diese Daten wurden nach dem Laden in die Datenbank als Zeitreihe visualisiert und auf offensichtliche Ausreißer (Lese- oder Schreibfehler bei der Digitalisierung) überprüft. Im zweiten Schritt der Datenprüfung wurden alle Einzelwerte gegengeprüft, die außerhalb eines Bereiches lagen, der durch den dreifachen Wert der Streuung um den Mittelwert (3-Sigma-Schranke) gebildet wurde. Alle Werte innerhalb dieses Bereiches gehören mit einer über 99 %-igen Wahrscheinlichkeit zur gleichen Gesamtmenge (bei angenommener Normalverteilung). Nach diesem Ausreißertest erfolgte eine Homogenitätsprüfung der Datenreihe. Als homogene Vergleichsreihe benutzten wir die Potsdamer Reihe. Es wurden die Differenzen der Tagesmittelwerte 1905 bis 2004 verglichen und dann eine 3-Sigma-Schranke gebildet. Dies erfolgte für die Parameter Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit, Niederschlag und Luftdruck. Bei Kontrolle signifikanter Abweichungen in den Originalunterlagen konnten die teilweise noch vorhandenen Schreibfehler erkannt werden. Für die Parameter Temperatur und Niederschlag sind keine Homogenitätsunterschiede im Vergleich mit der Potsdamer Reihe vorhanden (Abb. 7-2). Die mittlere Differenz der beiden Temperaturreihen beträgt –0,15 K, d. h. die Lufttemperatur von Potsdam ist etwas höher als in Lindenberg.

Sämtliche Terminwerte der Tage, an denen die Tagesmitteltemperatur außerhalb dieser 3-Sigma-Schranke liegt, wurden geprüft, eventuell korrigiert oder bestätigt. So finden sich z. B. mit –6,7 K am 13. Mai 1945 und mit +6,5 K am 03. März 1948 die größten Unterschiede. In beiden Fällen erfolgte eine Umstellung des Witterungsverlaufes, die sich an den beiden Stationen zeitlich versetzt bemerkbar machte. Bei anderen Parametern (z. B. Druck, Wind) ist die Homogenität teilweise fraglich („Sprünge“). Die Ursachen werden noch untersucht. Dies ist sehr wichtig, da eine Inhomogenität der Messreihe, die durch Sensorwechsel, Modifizierung der Auswerteverfahren und -methoden hervorgerufen wird, zu einer Veränderung der Messwerte führen kann, die mehrere Größenordnungen höher ist als das gesuchte klimatologische Signal.

In der Abb. 7-3 werden die Monatsmitteltemperaturen von Lindenberg dargestellt. Leider ist im Datenmaterial eine Lücke vom Januar 1931 bis Juni 1932 vorhanden. Für diesen Zeitraum sind Unterlagen der 3-terminigen Klimareihe weder in Lindenberg noch im Zentralarchiv des DWD in Offenbach oder in der Regionalzentrale Potsdam auffindbar. Der höchste Monatsmittelwert wurde im Juli 1994 mit +23,1 °C, der tiefste im Februar 1929 mit –12,1 °C bestimmt. In der Grafik ist noch der klimatologische Mittelwert der Temperatur mit 8,7 °C und ein über 12 Monate gleitendes Mittel eingezeichnet. Man erkennt die Kälteperioden 1929, Anfang der vierziger Jahre und Mitte der achtzi-

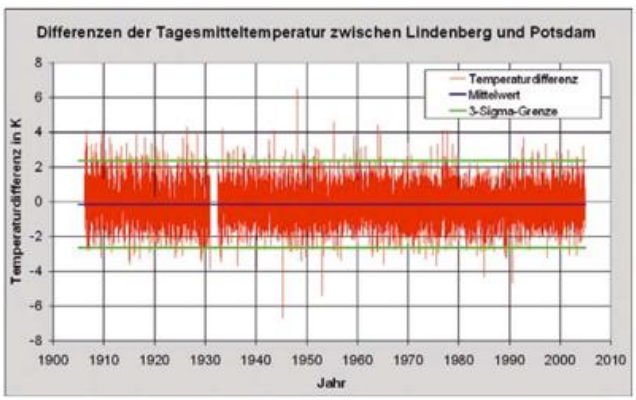


Abb. 7-2: Differenzen der Tagesmitteltemperatur zwischen Lindenberg und Potsdam.

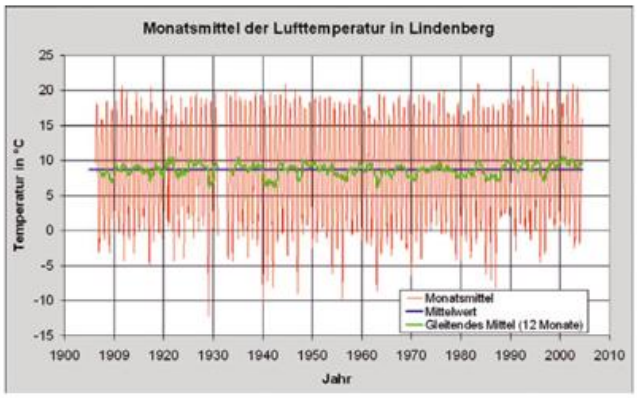


Abb. 7-3: Monatsmittel der Lufttemperatur in Lindenberg.

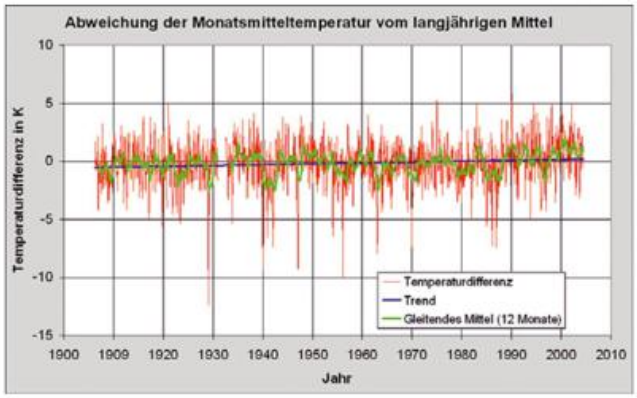


Abb. 7-4: Abweichung der Monatsmitteltemperatur vom langjährigen Mittel.

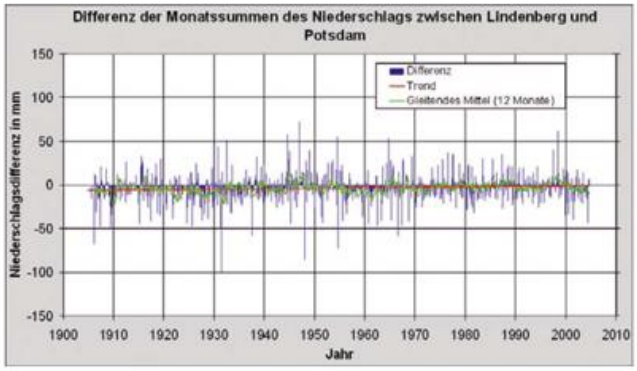


Abb. 7-5: Differenz der Monatssummen des Niederschlags zwischen Lindenberg und Potsdam.

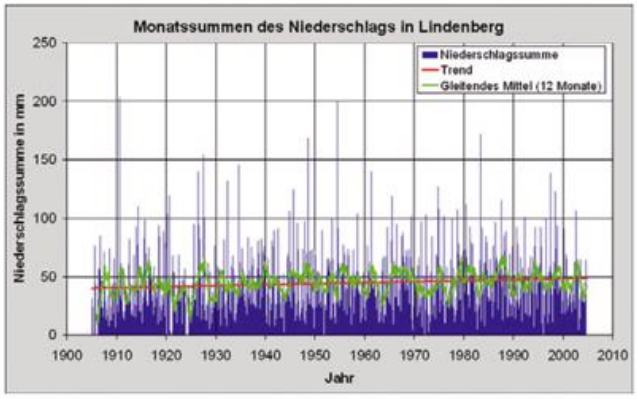


Abb. 7-6: Monatssummen des Niederschlages in Lindenberg.

ger Jahre. Dem steht eine Warmperiode der letzten 15 Jahre, mit Ausnahme des Jahres 1996, gegenüber. Der absolut höchste Wert der Lufttemperatur in den letzten hundert Jahren wurde am 11. Juli 1959 und am 09. August 1992 mit 38,5 °C in Lindenberg gemessen. Die tiefste Lufttemperatur wurde am 11. Februar 1929 mit –28,0 °C bestimmt.

In der Abb. 7-4 wird die Abweichung der Monatsmitteltemperaturen zu den mittleren Monatsmitteltemperaturen der Normalperiode 1961–1990 dargestellt. Hier sind ebenfalls die schon beschriebenen kälteren und wärmeren Perioden erkennbar, wobei auch hier der Februar 1929 mit –12,3 K die größte negative Abweichung zu den Monatsmitteltemperaturen der Normalperiode aufweist. Dagegen ist es nicht der Juli 1994 mit der höchsten positiven Abweichung, sondern der Februar 1990 hat mit +5,8 K den größten Unterschied. Deutlich sind in dieser Grafik die positiven Abweichungen der letzten 15 Jahre, mit Ausnahme des Jahres 1996, zu den monatlichen Temperaturwerten des Normalzeitraumes erkennbar. Neben den gleitenden Mitteln über 12 Monate (Tiefpass) ist auch eine Trendlinie der Abweichungen eingetragen, die eine Erwärmung von etwa 0,7 K für die fast 100 Jahre anzeigt.

Für den Niederschlag wurden ähnliche Untersuchungen wie für die Temperatur durchgeführt. Da der Niederschlag eine größere lokale Variabilität als die Temperatur besitzt, tritt eine höhere Streuung der Niederschlagsdifferenzen zwischen Lindenberg und Potsdam auf. In der Abb. 7-5 erkennen wir eine Tendenz zur Angleichung der Differenzen zwischen Lindenberg und Potsdam, wobei keine Änderungen der Variabilität der Differenzen der Monatssummen des Niederschlags von Lindenberg und Potsdam zu erkennen sind. Bei den Monatssummen des Niederschlages von Lindenberg (Abb. 7-6) ist gleichfalls ein Anstieg der monatlichen Niederschlagssummen bemerkbar. Der niederschlagsreichste Monat war der Juli 1907 mit 223,8 mm. Die höchste Tagessumme des Niederschlages wurde in Lindenberg mit 171,7 mm am 8. August 1978 gemessen.

3 Aerologische Daten

3.1 Historie

Das Meteorologische Observatorium Lindenberg wurde gegründet, um die ab etwa 1900 in Berlin begonnenen regelmäßigen Messungen in der freien Atmosphäre abseits des Einflusses einer Großstadt fortzuführen (s. Kap. 1). In den ersten Jahren waren es Drachen- und Fesselballonaufstiege mit Registriergeräten, wobei vorrangig MARVINsche Meteographen bei Drachenaufstiegen und Apparaturen von de BORT, HERGESELL-BOSCH und ASSMANN bei Registrierballonaufstiegen eingesetzt wurden. Im August 1919 gelang ein Drachenaufstieg bis in eine Höhe von 9.750 m, der auch heute noch als Höhenweltrekord für Drachen geführt wird.

In den Jahren 1921 bis 1931 wurden neben den Drachen- und Fesselballonaufstiegen auch Messungen mit Hilfe von Flugzeugen in der freien Atmosphäre über Lindenberg bis in Höhen von 6.000 m durchgeführt. Von H. Hergesell angeregt, baute K. Wegener eine wissenschaftliche Flugstelle auf. Die zwei Flugzeuge starteten bis 1922 von Adlershof aus, ab Ende 1922 vom Flugplatz Staaken. 1927 erfolgte die Verlagerung der wissenschaftlichen Flugstelle des Observatoriums zum Flugplatz Berlin-Tempelhof. Während in den beiden Jahren 1922 und 1923 nur 134 Aufstiege geflogen wurden, konnten in den Jahren 1928 und 1929 schon über 150 Flüge jährlich durchgeführt werden. Dies war vor allem durch ein neues Flugzeug, eine Junker A 20, erreicht worden, mit der Messungen in Höhen bis 8.500 m durchgeführt werden konnten. Am 01. Juni 1931 musste der Flugbetrieb an der wissenschaftlichen Flugstelle des Observatoriums eingestellt werden.

Mit der Entwicklung der ersten deutschen Radiosonde durch P. Duckert in Lindenberg erhielt die Sondierung der Atmosphäre einen entscheidenden Aufschwung. Nun konnten die meteorologischen Parameter in situ gemessen und sofort ausgewertet werden. Seit Januar 1929 wurden in Lindenberg Radiosondenaufstiege zwischen den Terminen der Fesselaufstiege durchgeführt. Ab Anfang der 30er Jahre bis 1945 wurden regelmäßig Messungen mit Radiosonden durchgeführt. Leider ist ein Teil der Aufstiegsdaten in den Wirren der beiden Weltkriege verloren gegangen. Dies betrifft die Zeiträume 1918 bis 1922 und 1939 bis 1945. Seit der Wiederaufnahme des Radiosondenaufstiegsbetriebes im Juli 1947 existieren die aerologischen Messdaten vollständig.

In der Abb. 7-7 wird die mittlere Verfügbarkeit von Temperaturmessungen an ausgewählten Hauptdruckflächen dargestellt. Für den Zeitabschnitt 1917–1922 existieren momentan nur Daten ausgewerteter Monatsmittel an Höhenstufen. Für diesen Zeitabschnitt wurden die Angaben aus dem Jahrbuch übernommen. In der Zeit von 1917–1922 wird für 700 und 850 hPa von etwa 25 Aufstiegen pro Monat ausgegangen. Momentan

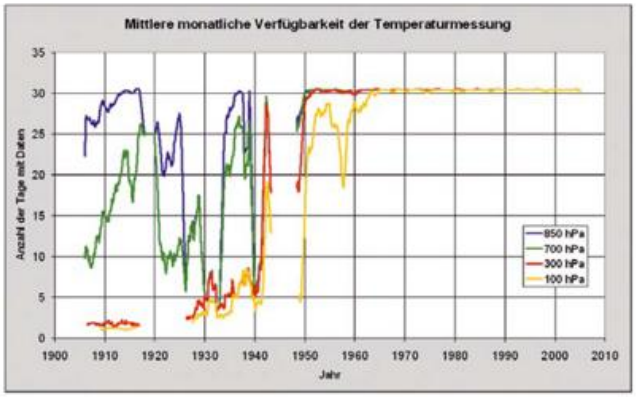


Abb. 7-7: Mittlere monatliche Verfügbarkeit der Temperaturmessung.

werden Aufstiege der Zeiträume 1917, 1926–1933 nacherfasst. Damit wird sich die Datendichte dieser Zeiträume deutlich erhöhen. Die größte Datenlücke in den aerologischen Aufstiegen ist der Zeitraum 1939–1945. Während dieser Zeit wurden regelmäßig Pilotierungen und Fesselaufstiege (z. B. 1944 noch 717 Fesselaufstiege) durchgeführt. Wahrscheinlich sind die Aufstiegsunterlagen durch die Verlagerungen nach Strakonitz im Februar 1945 verloren gegangen. Die Suche nach Daten des Abschnittes 1939–1945 wird fortgesetzt.

Seit 1947 wurden vier verschiedene Radiosondenarten eingesetzt. Von 1947 bis 1957 wurde die Vorkriegssonde LANG in Lindenberg geflogen. Aus dieser Sonde wurde die sogenannte FREIBERG-Sonde entwickelt, die bis 1971 im Einsatz war. Danach kamen verschiedene sowjetische Sonden (RKS, MARZ) zum Einsatz. Ab April 1992 wurde die RS80 der Firma Vaisala in verschiedenen Modifikationen benutzt. Seit dem 01. Juli 2004 ist im Routinebetrieb der aerologischen Station Lindenberg die digitale Sonde RS92 mit einem GPS-Windmesssystem der Firma Vaisala im Einsatz (siehe Tab. 7-2).

Mit den Sonden wurden auch Messsensoren, Messmethoden und Auswerteverfahren gewechselt bzw. modifiziert. Bei den Messsensoren wurden durch die technische Entwicklung im Laufe der Jahre im Wesent-

Jahr	Geräteträger	Messgerät	Drucksensor	Temperatursensor	Feuchtesensor	Windmessung	Höhenmessung
1905–1939	Drachen	Meteograph nach MARVIN	Bourdon-Röhren (luftleer) Aneoriddosen	Bourdon-Röhren (alkoholgefüllt) Bimetall	Haarhygrometer	Anemometer	Optische Vermessung
1905–1939	Fesselballon	Meteographen nach de Bort, Hergesell-Bosch oder Aßmann	Bourdon-Röhren (luftleer) Aneoriddosen	Bourdon-Röhren (alkoholgefüllt) Bimetall	Haarhygrometer	Anemometer	Optische Vermessung
1929–1957	Ballon	Radiosonde Lang	Aneoriddosen	Bimetall	Haarhygrometer	Theodolit	berechnet
1957–1971	Ballon	Radiosonde Freiberg	Aneoriddosen	Bimetall	Haarhygrometer	Radiotheodolit	berechnet
1971–1986	Ballon	Radiosonde RKS/Radar	berechnet	Thermistor	Goldschlägerhaut	Radar (Meteorit)	Radar
1986–1992	Ballon	MARZ/Radar	berechnet	Thermistor	Goldschlägerhaut	Radar	Radar
1992–1993	Ballon	RS80/Omega	Barocap	Thermocap	Polymer	Omega	berechnet
1993–2004	Ballon	RS80/Radar	Barocap	Thermocap	Polymer (A-Humicap)	Radar	Radar und berechnet
01.07.2004	Ballon	RS92/GPS	Barocap	Thermocap	2 Polymere (H-Humicap)	GPS	GPS und berechnet

Tab. 7-2: Aerologische Aufstiegstechnik.

lichen die Genauigkeit, der Strahlungsschutz und das Trägheitsverhalten der Sensoren verbessert. Die aerologische Station Lindenberg gehört seit 2004 zu den 152 Sondierungsstationen im GUAN-Messnetz der WMO (s. Kap. 8).

Die ersten Ozonmessungen in Lindenberg wurden von Duckert schon ab 1926 durchgeführt. Mittels eines Dobson-Spektrometers wurde der Gesamtozongehalt der Atmosphäre bestimmt. Bei der Auswertung der Messungen von 1926/27 wurde ein jährlicher Gang des Gesamtozongehaltes mit einem Maximum im Frühjahr und einem Minimum im Herbst gefunden. Fünfzig Jahre später wurde die Bestimmung der vertikalen Verteilung des Ozons in Zusammenhang mit der Klimadiskussion erneut wissenschaftlich und gesellschaftspolitisch hochaktuell. Seit Dezember 1974 werden in Lindenberg im Allgemeinen einmal wöchentlich Ozonsondierungen durchgeführt.Tab. 7-3 zeigt die in den vergangenen etwa 30 Jahren eingesetzten Ozonsondentypen.

Zeitraum	Sonde	Bemerkungen
1974–1977	OZ	
1977–1981	OSM	mechanische Umschaltung
1981–1987	OSR	mechan. für RKS 5
1987–1992	OSE	elektronische Umschaltung
ab Juli 1992	ECC	

Tab. 7-3: Gerätetechnik zur Ozonsondierung in Lindenberg.

3.2 Datensammlung aerologischer Daten und Aufbereitung der historischen aerologischen Daten

Die Erfassung, Digitalisierung und Speicherung der historischen aerologischen Lindenberger Daten erfolgte nur schrittweise über einen längeren Zeitraum. Im Jahre 1989 erfolgten die ersten Schritte bei der Aufbereitung und der Digitalisierung von aerologischen Daten der 4 ostdeutschen Radiosondenaufstiegsstellen Greifswald, Lindenberg, Meiningen und Dresden-Wahnsdorf für den Zeitraum ab 1961. Von 1989 bis 1992 wurden diese Stationen durch die ZRSD und mit Eingliederung in den DWD durch die Abt. Klima/Außenstelle Potsdam in die damalige Potsdamer Datenbank eingespeichert. Diese Daten wurden dann in den Datenspeicher des DWD überführt und befinden sich jetzt in der Klimadatenbank „MIRAKEL".

Erst im Jahr 2001 wurden die Arbeiten zur Erfassung historischer aerologischer Daten mit der Programmierung einer Erfassungsmaske für aerologische Daten des Zeitraumes 1946 bis 1960 fortgesetzt. In diese Erfassungsmaske wurden einfache Prüfalgorithmen (hydrostatische Richtigkeit, Überschreitung von Schwellwerten u. ä.) integriert. Die Erfassung der Lindenberger Daten von 1946–1960 mittels dieser Maske und eine Anpassung der Erfassungsmaske an die Datenstrukturen vor 1945 konnte erst im Jahr 2002 realisiert werden. Ein großer Arbeitsanteil bestand in der Sichtung der verschiedenen Datenquellen und in der Definition der einzelnen Anpassvorschriften. Alle Quellen stellten die Aufstiegsdaten in unterschiedlichen Formaten und Maßeinheiten dar, wobei teilweise auch Unterschiede in den Jahrgängen vorhanden waren. Für jede Quellenart musste eine spezielle Konvertierungsvorschrift vorgegeben werden. Die digitalisierten Aufstiege wurden gegengeprüft, bevor die Einspeisung der Daten in die Datenbank „Lindenberger Säule" erfolgte. Erst Ende 2004 konnten von uns historische Lindenberger Aufstiegsdaten (1905–1944) in die Datenbank geladen werden.

Durch umfangreiche Recherchen in verschiedenen meteorologischen Bibliotheken gelang es in jüngster Vergangenheit, weitere Originalquellen, z. T. Unikate, von Lindenberger Aufstiegsdaten zu erschließen. Diese Daten müssen noch digitalisiert und in die Datenbank überführt werden, um nach Prüfung und eventueller Korrektur die 100-jährige aerologische Reihe von Lindenberg zu vervollständigen.

4 Messung der Lufttemperatur

Die Lufttemperatur ist einer der wichtigsten Indikatoren zur Beschreibung der Struktur der Atmosphäre. Aus der mittleren Temperaturverteilung und der Entdeckung der wärmeren Schicht in der Höhe (Stratosphäre) durch R. Aßmann und T. de Bort im Jahre 1902 wurde die Schichteinteilung der Atmosphäre mit Troposphäre, Tropopause und Stratosphäre entwickelt. Schon Anfang des vorigen Jahrhunderts wurde von R. Aßmann u. a. erkannt, wie wichtig die Kenntnis der aktuellen Vertikalstruktur der Temperatur der Atmosphäre („3. Dimension") für die Wettervorhersage ist. Daraus resultierte die Forderung einer kontinuierlichen Vertikalsondierung der Atmosphäre. Bis in die Gegenwart ist die Bestimmung des Temperaturprofils aus Radiosonden ein wichtiger Eingangsparameter für die numerische Wettervorhersage. Lange Reihen der Temperaturmessungen in der freien Atmosphäre werden auch genutzt, um daraus Tendenzen der Klimaentwicklung abzuleiten.

Die in der Datenbank nunmehr vorliegenden aerologischen Daten konnten für den Zeitabschnitt vor 1945 bisher noch nicht vollständig auf Homogenität geprüft werden. Für diesen Zeitraum sind auch noch Perioden mit geringer Datendichte bzw. Datenlücken vorhanden. Die Arbeiten zur Schließung dieser Datenlücken werden fortgesetzt. Trotzdem ist es gerechtfertigt, auf der Basis des bisher vorliegenden Materials die Temperaturreihe über 100 Jahre zu analysieren.

Für die klimatologische Betrachtung der langen aerologischen Reihen der Temperaturmessung in der Atmosphäre, wurde die Temperatur an den Hauptdruckflächen 850, 700, 300 und 100 hPa ausgewählt. Zur Darstellung des Temperaturverlaufes an diesen Druckflä-

chen wurde aus allen Aufstiegen die Monatsmitteltemperatur der Druckfläche (Abb. 7-8 a-d) bestimmt. Trotz der Vorgabe, Mittelwerte nur bei mindestens 3 Aufstiegen im Monat zu bestimmen, treten in den frühen Zeitabschnitten doch noch extreme Abweichungen infolge der oft nur wenigen Aufstiege pro Monat auf. So sind z. B. die tiefen Mitteltemperaturen im Februar und März 1932 nur durch eine zu geringe Anzahl von Aufstiegen (3 bzw. 5) zu erklären. Die noch erheblichen Datenlücken erschweren momentan die Ermittlung signifikanter Trendaussagen. Erst durch Nacherfassung und die Schließung der vorhandenen Datenlücken können die Daten der unteren Druckflächen (bis etwa 500 hPa) zur Ableitung signifikanter klimatologischer Tendenzen für die letzten hundert Jahre herangezogen werden. Für die Druckflächen ab 100 hPa sind klimatologisch interpretierbare Daten erst ab den dreißiger Jahren des vorigen Jahrhunderts vorhanden. Die Qualitätsprüfung der Temperaturwerte vor 1960 ist noch nicht vollständig abgeschlossen. Bisher wurden alle markanten Punkte der Aufstiege auf hydrostatische Richtigkeit, Überadiabaten und Überschreitung von Schwellenwerten geprüft. Die Prüfung auf Inhomogenität innerhalb der Datenreihe und Auffälligkeiten beim Tag-/Nachtvergleich (Strahlungskorrektur) ist noch nicht erfolgt. Insofern sind die gezeigten Variationen für die letzten 100 Jahre nur ein erster Hinweis auf mögliche klimatologisch relevante Trends.

In den Abb. 7-9 a-d werden die Differenzen der Monatsmittel der einzelnen Monate zum Monatsmittelwert der Normalperiode 1961–1990 dargestellt. In den beiden unteren Druckniveaus erkennen wir einen leichten Temperaturanstieg, der bei 850 hPa mit 1,0 K etwas höher ausfällt, während der Anstieg bei 700 hPa mit 0,6 K dem Anstieg der Lufttemperaturen am Boden entspricht. Bei den beiden höheren Druckniveaus (Abb. 7-9 c, d) ist eine Abkühlung in den letzten 50 Jahren bemerkbar. Während die Abkühlung in 100 hPa relativ eindeutig erkennbar ist, ist im 300-hPa-Niveau nur eine leichte Temperaturabnahme im gegenwärtigen Datenmaterial sichtbar. Bei den Daten bis Mitte der fünfziger Jahre sind noch gründliche Untersuchungen bzgl. eines Strahlungsfehlers der Messungen erforderlich.

5 Messen der relativen Luftfeuchte in der freien Atmosphäre und Qualitätsprüfung

Die relative Luftfeuchte ist für die Strahlungsbilanz und den Energiehaushalt der Atmosphäre von besonderer Bedeutung. Die Feuchte beeinflusst in Form von Wasserdampf oder als Wolken in entscheidendem Maß Absorptions-, Emissions- und Reflexionsprozesse in allen Spektralbereichen der solaren und terrestrischen Strahlung. Darüber hinaus wirkt Wasser in der freien Atmosphäre auch durch seine chemischen Eigenschaften und seine Fähigkeit, die Atmosphäre „auszuwaschen". Damit kommt der genauen Bestimmung des atmosphärischen Feuchtegehaltes in gasförmigem,

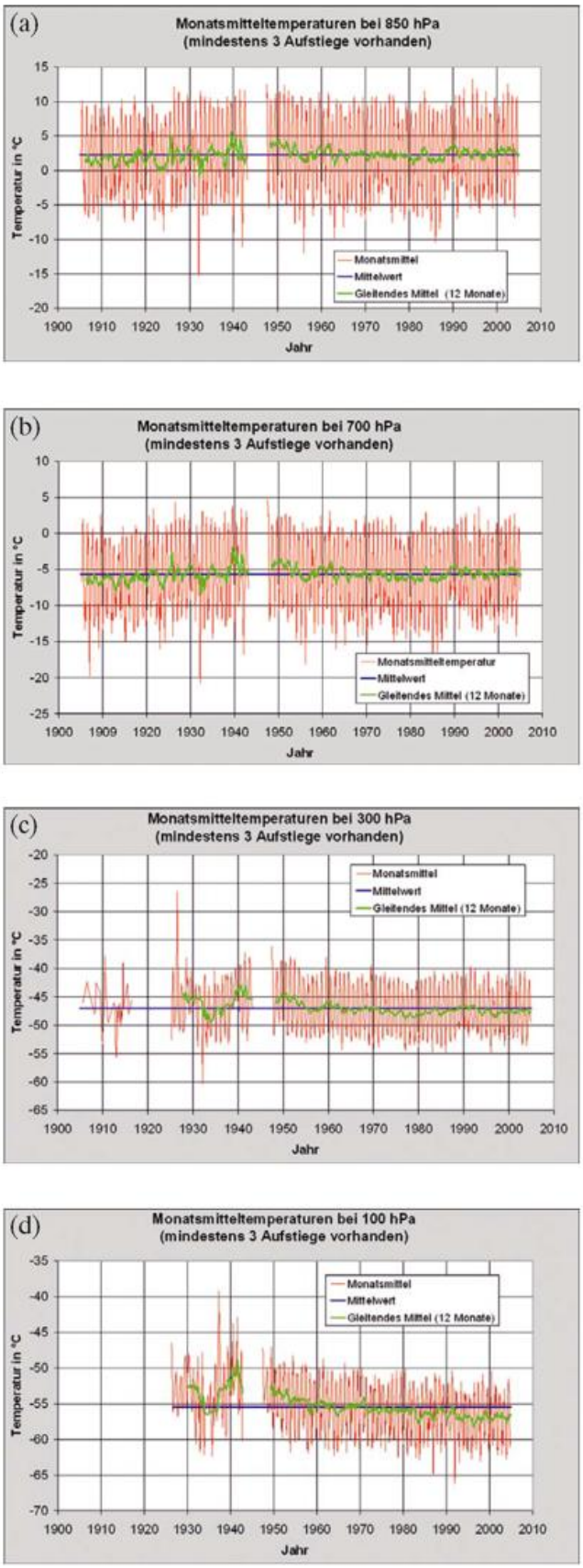


Abb. 7-8: Monatsmitteltemperaturen bei (a) 850, (b) 700, (c) 300 und (d) 100 hPa.

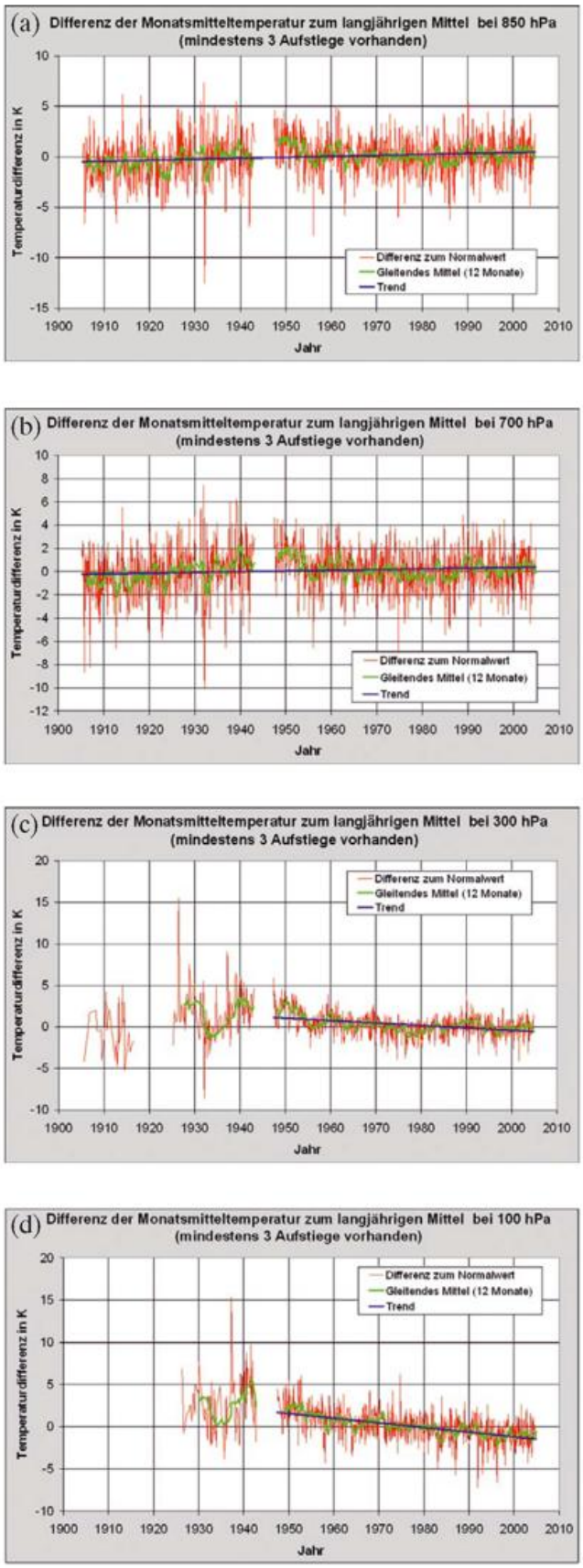


Abb. 7-9: Differenz der Monatsmitteltemperatur zum langjährigen Mittel bei (a) 850, (b) 700, (c) 300 und (d) 100 hPa.

flüssigem und festem Aggregatzustand neben der Temperatur-, Wind- und Druckmessung in der Aerologie eine hervorragende Bedeutung zu. Für die Messung der relativen Luftfeuchte wurden in der Geschichte der Aerologie im Wesentlichen vier unterschiedliche Sensortypen genutzt:

- Haarharfe — Registriergeräte für Drachen und Fesselballon, LANG-, FREIBERG-Sonde,
- Goldschlägerhaut — russische Radiosonden RKS und MARZ,
- Carbonhygristor — in den in Lindenberg nicht genutzten Radiosonden von GRAW und VIZ,
- Polymersensor — finnische Radiosonden RS80, RS90, RS92.

In den letzten Jahren wurden auch Taupunktspiegel und optische Sensoren (Lyman-Alpha-Hygrometer) für die Feuchtesondierung der Atmosphäre eingesetzt. Für die Routinesondierung sind diese Geräte jedoch noch zu teuer.

Ein großes Problem für die Messung der Luftfeuchte ist die Bestimmung der relativen Feuchte bei negativen Temperaturen (s. Kap. 4). Untersuchungen von SODEN und LANZANTE (1996) zeigen, dass es zwischen den verschiedenen Feuchtesensoren sehr große systematische Unterschiede gibt (Vergleich von Satellitendaten und Daten der Radiosondierungen in der oberen Troposphäre). Aus diesem Grund und dem im Lindenberger Datensatz festgestellten „Bruch" in den Messreihen der relativen Luftfeuchte beim Wechsel des Messinstrumentes wurde ab etwa 1995 am MOL versucht, die Messung der Luftfeuchte mit operationellen Radiosonden zu verbessern (siehe Abb. 7-10). Dazu wurden seit 1999 wöchentlich einmal Präzisionsfeuchteradiosondierungen mit der Lindenberger Referenzsonde (FN-Verfahren, modifizierte RS90-Radiosonde) durchgeführt (s. Kap. 4). Die Präzisionsfeuchtemessungen mit Hilfe des FN-Verfahrens erreichen Genauigkeiten bei der relativen Feuchtemessung von 1 % relativer Feuchte in der freien Atmosphäre, s. NAGEL et al. (2001) .

Aus dem Vergleich der RS80-Routinesondierungen, den Präzisionsfeuchtemessungen und der Untersuchung von RS80-Sondierungen mit Auf- und Abstieg wurde ein Korrekturverfahren für die Feuchtemessung mit der RS80-A-Humicap-Sonde entwickelt. Das Korrektur-Verfahren für die RS80-Feuchte, s. LEITERER et al. (1998), nutzt folgende zusätzliche Schritte:

- Anbringen einer Groundcheck-Korrektur für 100 % relative Feuchte,
- Anbringen der Trägheitskorrektur (abhängig vom Feuchtegradienten und der Temperatur),
- Anbringen einer temperaturabhängigen Korrektur,
- Streichen der relativen Feuchte bei Vereisung des Feuchtesensors.

Durch Untersuchung des Gradienten der relativen Feuchte gleicher Messsensoren und Bestimmung der Regressionsgeraden wurden die zurückliegenden Messungen korrigiert, s. LEITERER et al. (2001). Damit war es möglich, die Zeitreihe der Wasserdampfverteilung in der freien Atmosphäre über Lindenberg, als wichtigstes Treibhausgas, zu homogenisieren. Mit den ermittelten Korrekturen wurde eine Datenqualität erreicht, die eine klimatologische Auswertung der Feuchteprofilmessungen zulässt. Für Lindenberg wurde eine erste Version der Zeitreihe der relativen Feuchte über mehr als 50 Jahre erstellt. In den Abb. 7-10 a-c sind die Originalwerte und die korrigierten Feuchtewerte in den unterschiedlichen Atmosphären-Niveaus dargestellt.

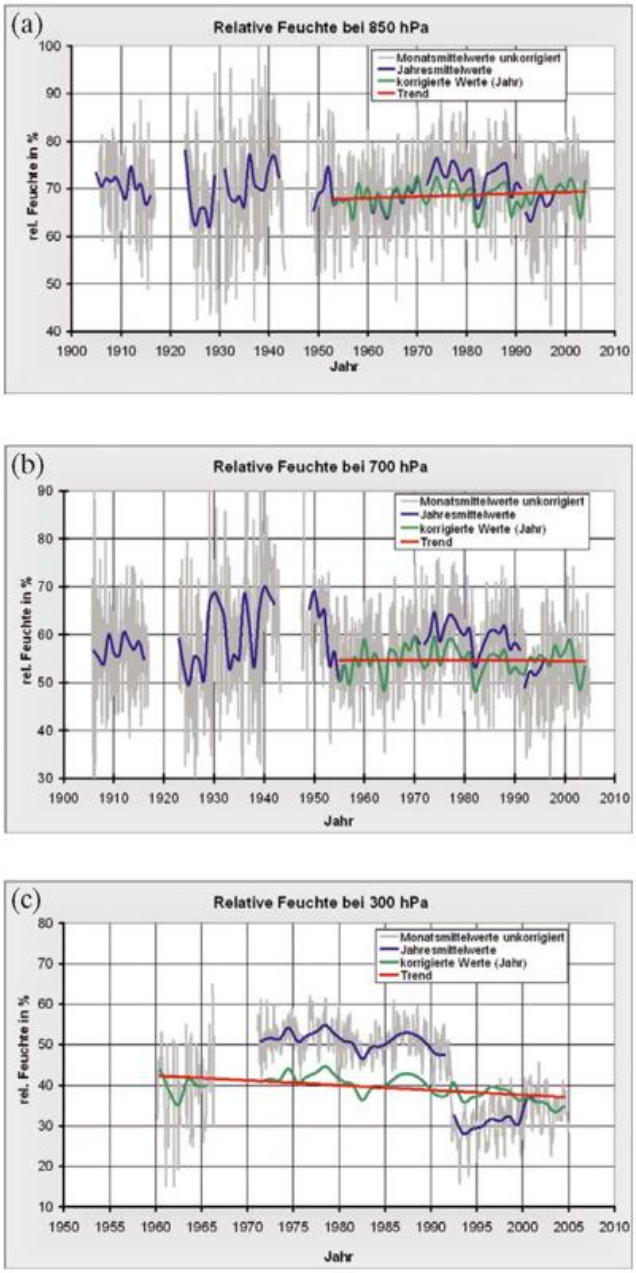


Abb. 7-10: Verlauf der relativen Feuchte bei (a) 850 hPa (etwa 1,5 km), (b) 700 hPa (etwa 3 km, (c) 300 hPa (etwa 9 km).

Längere Feuchtemessungen findet man für das 850-hPa-Niveau. Allerdings sind für die Jahre vor 1953 weitere Untersuchungen notwendig. Im Jahr 1953 fand eine Überarbeitung der Kalibriereinrichtung des Feuchtesensors in Lindenberg statt. Seit dem Betrieb der neuen Feuchtekalibriereinrichtung im Jahre 1953 wurden die Werte zuverlässiger. Seit 1953 ist in dieser Schicht eine geringe Zunahme der relativen Feuchte von etwa 1,3 % in den letzten fünfzig Jahren nach der durchgeführten Homogenisierung zu verzeichnen.

Auch für das 700-hPa-Niveau finden wir zuverlässige Werte erst ab 1953. Nach der Umstellung der Eichung wurden verlässliche Feuchtewerte in der Atmosphäre gemessen. Ein Trend für die letzten 50 Jahre kann in dieser Höhenschicht nicht festgestellt werden.

Für das 300-hPa-Niveau stehen verlässliche Werte erst ab den sechziger Jahren zur Verfügung. In den Jahren vorher wurde dieses Niveau bei der Feuchtemessung sehr selten erreicht, was auch für den Zeitraum 1966–1970 zutrifft. In diesem Zeitraum wurden Messwerte oberhalb der 400 hPa in der Auswertung nicht berücksichtigt. Seit dem Jahr 2000 werden alle Korrekturen für den RS80-A-Humicap-Sensor bei der Auswertung der Feuchtemessung online angebracht. Die Abb. 7-10 c zeigt den Verlauf der relativen Feuchte an der Hauptdruckfläche 300 hPa. Es ist eine Feuchteabnahme von etwa 3 % relativer Feuchte in den letzten 45 Jahren in der oberen Troposphäre über Lindenberg zu beobachten.

6 Profilmessungen des Ozons in der freien Atmosphäre

Ozon ist das dreiatomige Molekül des Sauerstoffs und ein natürliches Spurengas in der Atmosphäre. Ozon entsteht durch Einwirkung von ultravioletter Strahlung (UV) auf den Luftsauerstoff und wird mit den Luftströmungen transportiert und wieder abgebaut. Das Ozon hat in Abhängigkeit vom geographischen Ort und der Jahreszeit eine typische Verteilung mit der Höhe. Weniger als 10 % des Ozons befinden sich in der Troposphäre, über 90 % in der Stratosphäre. Ab Dezember 1974 wurden am Meteorologischen Observatorium Lindenberg Ozonsondierungen durchgeführt. Unter Benutzung der Berliner Ozonsondierungen (in Berlin-Tempelhof) vom 2.11.1966 bis 17.01.1973 ist die Reihe Berlin-Lindenberg eine der längsten Ozondatenreihen in Mitteleuropa.

Abb. 7-11 zeigt die mittlere Vertikalverteilung des Ozons über Lindenberg in Abhängigkeit von der meteorologischen Jahreszeit. Aus dem 30jährigen Mittel ist deutlich erkennbar, dass die Werte in der Ozonschicht im meteorologischen Winter und Frühling deutlich höher liegen als in den Sommer- und Herbstmonaten. Dagegen finden wir in der Grundschicht die höchsten Ozonkonzentrationen in den Sommermonaten.

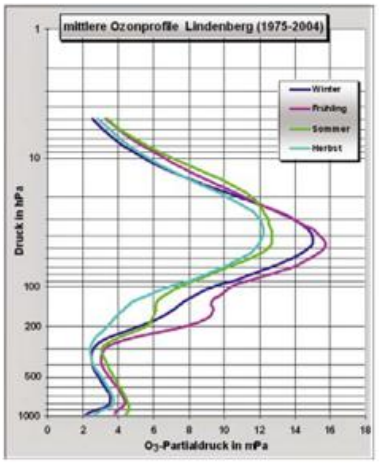


Abb. 7-11: Mittlere Ozonverteilung über Lindenberg in Abhängigkeit von der meteorologischen Jahreszeit.

In der Schicht mit der maximalen Ozonkonzentration im Bereich von 20 bis 23 km Höhe (Ozonschicht) wird die ankommende Sonnenstrahlung im UV-Bereich absorbiert. Diese Schicht wirkt somit nach dem Erdboden als zweite Heizschicht der Atmosphäre. Durch menschliche Aktivitäten (Emissionen von ozonzerstörendem Chlor und anderen aggressiven Halogeniden [FCKW]) wurde der natürliche Ozonkreislauf empfindlich gestört. Dabei können wenige Chlorradikale, die als Katalysatoren wirken, viele Ozonmoleküle zerstören. Zum stärksten Ozonabbau kommt es dabei über den Polen unserer Erde mit der alljährlichen Ausbildung des „Ozonloches".
Die Ozonschicht schützt das Leben an der Erdoberfläche vor zuviel ultravioletter Strahlung, lässt aber die für eine Vielzahl wichtiger biologischer Prozesse notwendige Sonnenstrahlung passieren. Die über die letzten Jahrzehnte erfolgte Schwächung der Ozonschicht erhöht die an der Erdoberfläche ankommende UV-Strahlung. Das Risiko der Schädigung von Mensch, Tier- und Pflanzenwelt durch die UV-Strahlung nimmt zu. Änderungen der Ozonverteilung in der Stratosphäre sind auch klimarelevant, da eine enge Wechselwirkung zwischen Ozon und Temperatur besteht. Die stratosphärische Ozonabnahme ist mit einer Abkühlung der Stratosphäre verbunden, wobei der Ursache-Wirkungs-Zusammenhang nicht eindeutig geklärt ist (s. pro*met*, Jahrgang 31, Heft 1, 2005).

In der Abb. 7-12 a ist die prozentuale Abweichung der Monatsmittelwerte vom 30jährigen Lindenberger Monatsmittelwert (1975–2004) in der Ozonschicht dargestellt. Neben der mittleren Abnahme werden die Einbrüche in den Jahren 1982/83 und 1993/94 deutlich sichtbar, die auf Vulkanausbrüche (El Chicon 1982; Pinatubo 1991) und dem damit verbundenen Eintrag von Teilchen und chemischen Substanzen in die Stratosphäre zurückzuführen sind. Eine genaue Auswertung der Daten, welche im Zeitraum 1967 bis 1973 in Berlin gemessen wurden, steht noch aus (Korrektur durch Gesamtozonmessung). Die ausgewiesene Tendenz der Ozonabnahme fällt weniger stark aus als z. B. am Hohenpeißenberg. In der Abb. 7-12 b wird die Zunahme des Ozons in der bodennahen Schicht ausgewiesen,

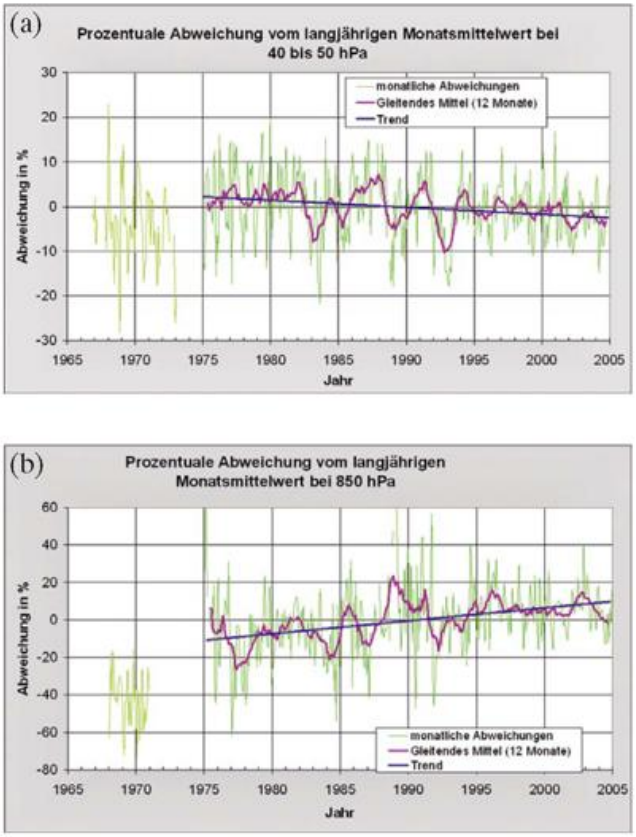


Abb. 7-12: Prozentuale Abweichung des Monatsmittelwertes des Ozons vom langjährigen Monatsmittelwert (1975 bis 2004) in der (a) Ozonschicht (40 bis 50 hPa, etwa 22 km) und in der (b) Grundschicht (850 hPa, etwa 1,5 km).

hier stimmt der Trend mit der Zunahme am Hohenpeißenberg überein.

Die Erhöhung der Ozonkonzentration in der Troposphäre führt zu direkten Schädigungen von Zellen, insbesondere der Atmungsorgane von Mensch und Tier. Eine Ozonzunahme in der Troposphäre trägt außerdem zu einer Verstärkung des sogenannten Treibhauseffektes bei, hat also auch Auswirkungen auf das Klima.

7 Zusammenfassung:

Seit 2004 werden die Klimadaten Lindenberg nacherfasst. In den vorhandenen Quellen fehlen die Daten des Luftdruckes, der Temperatur, der relativen Feuchte und des Windes für den Zeitraum Januar 1931 bis Juni 1932. Die täglichen Niederschlagssummen dieses Zeitraumes wurden den Registrierstreifen der Regenschreiber entnommen. Die Arbeiten zur Nacherfassung weiterer Parameter (z. B. Sonnenscheindauer, Schneehöhen, Temperaturmaximum und Temperaturminimum) wurden begonnen. Bei den Parametern Temperatur und Niederschlag wurden im Vergleich zu den Potsdamer Daten keine Homogenitätsunterschiede festgestellt. An den Daten des Windes, der relativen Feuchte und des Luftdruckes wurden Inhomogenitä-

ten bemerkt. Die Ursachen sind noch nicht vollständig analysiert, Korrekturmethoden werden zurzeit geprüft. Bisher wurden nur Korrekturen an Hand der Originaldaten durchgeführt. Aus dem vorliegenden Datenmaterial kann eine Temperaturerwärmung von etwa 0,7 K, wie in der ICCP-Studie (2001) festgehalten wird, bestätigt werden. Weiterhin kann aus der Niederschlagsreihe ein Anstieg der monatlichen Niederschlagsummen für Lindenberg abgeleitet werden.

Die größte Datenlücke in den aerologischen Aufstiegen ist der Zeitraum 1939–1945. Für den Zeitraum 1917–1922 wurde in den Darstellungen auf ausgewertete Monatsmittelwerte zurückgegriffen. Für das Jahr 1917 wurde ein Exemplar der Zusammenfassung der täglichen Fesselaufstiege gefunden. Zusammen mit der Nacherfassung weiterer Aufstiege der Jahre 1926–1933 erhoffen wir eine stärkere statistische Sicherheit bei unseren Untersuchungen. Zur Bestimmung des Strahlungsfehlers der Radiosonden wurden die Tag-/Nachtdifferenzen bei der Temperaturmessung unterteilt nach Radiosondentyp (LANG-, FREIBERG-, RS80- und russische Sonden) und Monaten bestimmt. Die Strahlungskorrektur wurde noch nicht durchgeführt. Weiterhin ist an den Daten 1947 bis März 1957 noch keine Korrektur auf Grund der 3-stündigen Terminverschiebung (von 03 Uhr auf 00 Uhr) angebracht worden.

Trotz der noch vorhandenen Unsicherheiten der Daten (Datenlücken, unvollständige Korrekturen) kann aus dem vorhandenen Datenmaterial die Klimatendenz abgeleitet werden, dass in der unteren Troposphäre (850 und 700 hPa) eine Erwärmung in der gleichen Größenordnung (~0,8 K) wie am Boden vorhanden ist. Oberhalb der Tropopause (100 hPa) kann eine deutliche Abkühlung in den Daten der letzten fünfzig Jahre festgestellt werden. Für die Feuchte kann in der unteren Troposphäre eine schwache Zunahme verzeichnet werden, während in der oberen Troposphäre (300 hPa) eine Abnahme der relativen Feuchte konstatiert wird. Schließlich bestätigen unsere Ozonmessungen die Zunahme des Ozons in der unteren Atmosphäre und die Abnahme in der Schicht des Maximum des vertikalen Ozonpartialdruckes (etwa 20 km).

Abkürzungen

1. BSRN	**B**aseline **S**urface **R**adiation **N**etwork
2. CEOP	**C**oordinated **E**nhanced **O**bserving **P**eriod
3. FN-Verfahren	Verfahren der standardisierten Frequenzen zur Auswertung der Messungen der Feuchte
4. GPS	**G**lobal **P**ositioning **S**ystem
5. GUAN	**G**lobal Climat Observing System-**U**pper **A**ir **N**etwork
6. LITFASS	**L**indenberg **I**nhomogeneous **T**errain-**F**luxes between **A**tmosphere and **S**urface: a long-term **S**tudy
7. WOUDC	**W**orld **O**zone and **U**ltraviolet Radiation **D**ata **C**entre
8. ZRSD	**Z**entralstelle des **R**adiosonden**d**ienstes

Literatur

ADAM, W., H. AHRENSDORF, K. SCHROBITZ, 1997: Klimadaten Lindenberg, interner Projektbericht.

IPCC, 2001: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of the Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Houghten, J. T. et al.), Cambridge and New York 2001.

LEITERER, U., H. DIER, T. NAEBERT, 1998: Improvements in Radiosonde Humidity Profiles Using RS80/RS90 Radiosondes of Vaisala. In: Papers presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-98), *WMO Instruments and Observing Methods Report* No **70**. WMO/TD-No. 877, 215-219.

LEITERER, U., H. DIER, W. ADAM, 2001: Aerologischer Schichtaufbau der Atmosphäre und Trends über Lindenberg. In: Klimastatusbericht 2000. Deutscher Wettterdienst Offenbach, ISBN 3-88148-368-3, 7-14.

NAGEL, D., U. LEITERER, H. DIER, A. KATS, J. REICHARDT, A. BEHRENDT, 2001: High Accuracy Humidity Measurements Using the Standardized Frequency Method with a Research Upper-Air Sounding System. *Meteorol. Z.* **10** (5), 395-405.

SODEN, B. J., J. R. LANZANTE, 1996: An assessment of satellite and radiosonde climatologies of upper-tropospheric water vapor. *J. Climate* **9**, 1235-1250.

Ergebnisse der Arbeiten des Königlich Preußischen Aeronautischen Observatoriums bei Lindenberg:

Band I	1905
Band II	1906
Band III	1907
Band IV	1909
Band V	1910
Band VI	1911
Band VII	1912
Band VIII	1913
Band IX	1914
Band X	1916
Band XI	1916
Band XII	1918

Die Arbeiten des Preußischen Aeronautischen Observatoriums bei Lindenberg, Wissenschaftliche Abhandlungen:

Band XIII	1919
Band XIV	1922
Band XV	1926
Band XVI	1930
Band XVII	1932

promet, Jahrg. 31, Nr. 2–4, 171-177 (Oktober 2005)
© Deutscher Wetterdienst 2005

F. H. BERGER, J. NEISSER

8 Das Meteorologische Observatorium Lindenberg – nationaler und internationaler Referenzstandort –

The Meteorological Observatory Lindenberg – the national and international reference station –

Zusammenfassung
Mit Bezug auf den gesetzlichen Auftrag des DWD werden die Beiträge des MOL bei der Erfüllung dieses Auftrages kurz beschrieben. Für die in den Sachgebieten durchgeführten Forschungsarbeiten (s. Kap. 3 bis 7) wird der aktuelle Stand einer Mitwirkung des MOL in Programmen der WMO und des WCRP sowie bei ausgewählten internationalen Projekten dargestellt. Die wissenschaftlichen Ziele und z. T. bereits mehrjährigen Arbeiten des MOL als Referenzstation werden für folgende Programme/Projekte zusammenfassend erläutert: GVaP, RA-VI, BSRN; CEOP, GABLS, BALTEX, GUAN, ADM-Aeolus, WINPROF, SUVMONET, SUVDAME/EDUCE, Ozon-Kampagnen. Abschließend wird ein Ausblick auf zukünftige Referenzaufgaben gegeben.

Abstract
With reference to the fundamental demands of the German law about the Meteorological Service (DWD) the main tasks in the scientific programme of the Meteorological Observatory Lindenberg (MOL) are shortly characterised. Especially the activities of the MOL are presented for the participation as reference station „MOL" in the international programmes/projects GVaP, RA-VI, BSRN, CEOP, GABLS, BALTEX, GUAN, ADM-Aeolus, WINPROF, SUVMONET, SUVDAME/EDUCE, OZONE. A outlook is give on future projects with the 4 D „Lindenberg Column".

1 Hintergrund

Seit der Gründung des Observatoriums und der feierlichen Eröffnung durch Kaiser Wilhelm II im Jahre 1905 ist eine der Hauptaufgaben die Vertikalsondierung der Atmosphäre. Waren es in den ersten etwa 30 Jahren Ballon- bzw. Drachenaufstiege mit dem noch immer gültigen Weltrekord vom 1.8.1919 mit einer Höhe von 9.750 m, um eindimensional die atmosphärischen Eigenschaften zu bestimmen, so ist es heute das Ziel, die atmosphärischen Eigenschaften vierdimensional zu erfassen.

Dabei sind die Aufgaben des Observatoriums eindeutig durch das DWD-Gesetz vom 19.10.1998, BGBL I, definiert. So heißt es im Artikel 4 des DWD-Gesetzes: *Die Aufgaben des Deutschen Wetterdienstes sind ... 4. die kurzfristige und langfristige Erfassung, Überwachung und Bewertung der meteorologischen Prozesse, Strukturen und Zusammensetzung der Atmosphäre, und 5. die Erfassung der meteorologischen Wechselwirkung zwischen der Atmosphäre und anderen Bereichen der Umwelt.* In Artikel 5 des DWD-Gesetzes heißt es weiter: *Zur Erfüllung seiner Aufgaben betreibt der Deutsche Wetterdienst wissenschaftliche Forschung im Bereich der Meteorologie und verwandter Wissenschaften und wirkt bei der Entwicklung entsprechender Standards und Normen mit.* Basierend auf den oben genannten gesetzlichen Vorgaben werden am Meteorologischen Observatorium Lindenberg somit

- vielfältige Langzeitmessungen in der Atmosphäre mit Standard-Messverfahren durchgeführt (s. Kap. 3 bis 6),
- geprüfte atmosphärische Referenzdaten der Lindenberger Säule (Abb. 8-1) zusammen- und bereitgestellt (s. Kap. 7),

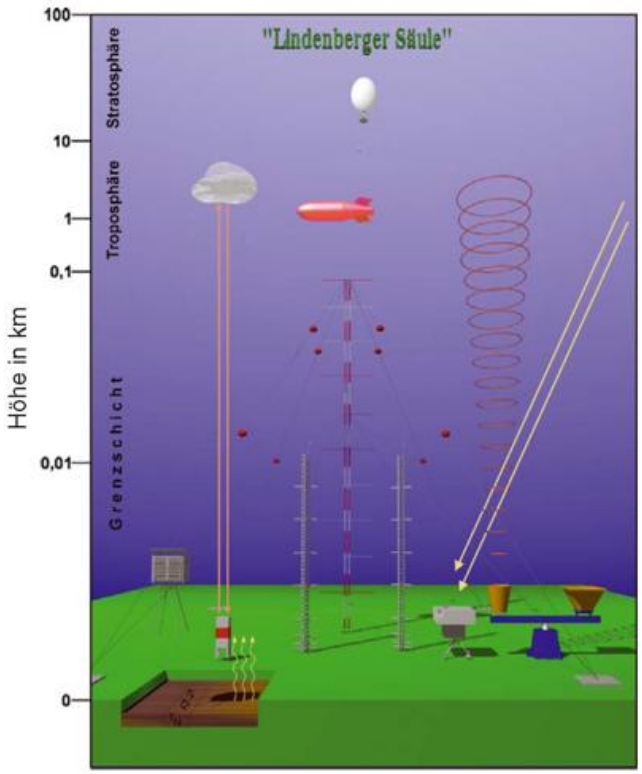


Abb. 8-1: Lindenberger Säule – Das Messsystem zur Beobachtung atmosphärischer Eigenschaften, bestehend aus: Bodenbeobachtungen, aerologischen Messungen, aktiven und passiven Fernerkundungsmethoden.

- kontinuierliche wissenschaftlich-technische Forschung zur Optimierung der Beobachtung realisiert (s. Kap. 3 bis 6) und
- neue Messverfahren getestet und gegebenenfalls implementiert (s. Kap. 3 bis 6).

Die Gesamtheit aller Messungen kann für die Verbesserung der Vorhersagbarkeit numerischer Atmosphärenmodelle (von Wettervorhersagemodellen bis hin zu komplexen Erdsystemmodellen) auf den verschiedenen Zeit- und Raumskalen genutzt werden, zur Evaluierung der Modellergebnisse und auch zur Initialisierung der Modellsimulationen oder auch zur Assimilation von Messdaten in ein numerisches Modell. Ein weiterer wichtiger Grund ist die komplexe, womöglich komplette Beobachtung sämtlicher Atmosphärenparameter zur Generierung langer Messreihen mit einer möglichst hohen zeitlichen Auflösung. Diese Daten können dann nicht nur für die Diagnose wetterrelevanter Prozesse, sondern auch für klimarelevante Prozesse genutzt werden. Sie sind so für die Erkennung der Klimavariabilität bzw. einer Klimaänderung von großer Bedeutung.

2 Aktuelle Referenz

Bevor auf die aktuelle Referenz im Detail eingegangen wird, soll an dieser Stelle auf zwei Aspekte hingewiesen werden. Als Referenz können Messdaten oder Messmethoden einerseits zur Kalibrierung einzelner Atmosphäreneigenschaften, wie z. B. die relative Feuchte, und andererseits als präzise Datensätze für die Evaluierung von Modellergebnissen oder anderen Beobachtungen, wie z. B. aus Satellitendaten abgeleitete Ergebnisse, genutzt werden. So werden gegenwärtig im Rahmen einzelner WMO-Programme unterschiedliche Aspekte bearbeitet. In den nun folgenden Abschnitten soll jede einzelne Referenzstation kurz vorgestellt werden.

2.1 GVaP Referenzstation

Im Rahmen des Globalen Energie- und Wasserkreislaufexperimentes GEWEX wurde das **G**lobal Water **Va**pour **P**roject (GVaP) initiiert. Seit dem Jahr 1999 wird das Meteorologische Obervatorium Lindenberg schrittweise zu einer GVaP-Referenzstation ausgebaut. Das Level-2 einer GVaP Referenzstation war bereits im Jahr 2000 gegeben. Mit dem Einsatz des operationellen DWD-Raman-Lidar wird das Observatorium in diesem Jahr (nach der CART-site in Oklahoma/USA) die zweite Station weltweit sein, die das Level-1 erreicht. Aufgabe der Referenzstation ist dabei die Quantifizierung sowie Förderung des Verständnisses der Rolle des Wasserdampfes und seiner Variabilität, des Einflusses auf den Strahlungshaushalt sowie die Veränderung durch menschliche Aktivitäten. Dies ist wiederum von herausragender Bedeutung für die Beschreibung und weiterführend für die Parameterisierung meteorologischer, hydrologischer und klimatologischer Prozesse in numerischen Modellen unterschiedlicher zeitlicher und räumlicher Auflösung. Durch die detaillierte Untersuchung des Wasserdampfes in der Atmosphäre ist man nun in der Lage, Aspekte der natürlichen bzw. anthropogen verursachten Variabilität zu untersuchen. So sind weltweit etwa sieben Stationen als globales Netzwerk von Kalibrations- bzw. Validierungs-Standorten (GVaP-Stationen) eingerichtet, wobei Lindenberg gegenwärtig die einzige Referenzstatation in Europa ist. Ausgewählte erste Ergebnisse sind in Kapitel 5 dieses Heftes nachzulesen.

2.2 RA-VI Strahlungszentrale

Im Internationalen Geophysikalischen Jahr 1957/58 wurden weltweit einheitliche Strahlungsmessungen verlangt. Iniitiert und vorangetrieben wurden dabei die Einrichtung von Strahlungszentren durch die IAMAP (**I**nternational **A**ssociation of **M**eteorology and **A**tmospheric **P**hysics) und durch die CIMO (**C**ommission of **I**nstruments and **M**ethods of **O**bservation). Letztere koordiniert mit dem WMO-Sekretariat auch die verschiedenen Strahlungszentren (RA). 1986 wurde dem Meteorologischen Observatorium Hamburg die Aufgabe einer regionalen Strahlungszentrale innerhalb der RA-VI übertragen. Seit Auflösung des Meteorologischen Observatoriums Potsdam 2002 werden diese Aufgaben vom Meteorologischen Observatorium Lindenberg wahrgenommen. Gegenwärtig gibt es ein Weltstrahlungszentrum (Davos) und weltweit 20 Regionalzentralen, wobei die RA-VI (Europa) sieben Regionalzentralen hat. Ziel der Regionalzentrale sind einerseits die Kalibrierung von Strahlungsmessgeräten, andererseits aber auch die Auswertung diverser Strahlungsmessungen. Ausgewählte Beiträge zu den wissenschaftlichen Arbeiten sind in Kapitel 3 dieses Heftes vorgestellt

2.3 BSRN Referenzstation

BSRN (**B**aseline **S**urface **R**adiation **N**etwork) ist ein Programm des Weltklimaforschungsprogrammes (WCRP) und des **G**lobalen **E**nergie- und **W**asserkreislauf**ex**perimentes (GEWEX). Der Aufbau einer Messstation und erste Testmessungen des DWD im Rahmen des BSRN erfolgten im ersten Halbjahr 1994. Offizieller Messbeginn am Standort Lindenberg war der 1. Oktober 1994. Anfang 2004 wurde der Status des BSRNs aufgewertet und zum globalen Basisnetz für Strahlungsmessungen am Erdboden im Rahmen des Globalen Klimaüberwachungssystem (GCOS) ernannt. Die Hauptaufgabe jeder einzelnen Station im Messnetz ist die Bestimmung der einzelnen Strahlungsflüsse an der Erdoberfläche. Die Variabilitäten der Strahlungsflüsse und der Strahlungsbilanz können danach weiterführend mit Klimaänderungen in Verbindung gebracht werden. Darüber hinaus sind die BSRN-Daten von herausragendem Nutzen für die Validierung von aus Satellitendaten abgeleiteten Strahlungsflüsse bzw. für die Evaluierung modellierter Strahlungsflüsse. Gegenwärtig gibt es weltweit nahezu

40 Stationen in den verschiedensten Klimazonen, die die solare und atmosphärische Strahlung mit der höchsten erreichbaren Genauigkeit – in Lindenberg besser als 1 % der jeweiligen, maximalen Strahlungsflüsse – und in hoher zeitlicher Auflösung (1 min) messen (OHMURA et al 1998). In der RA VI gibt es 11 Stationen, davon 8 aktive Stationen, zu denen auch Lindenberg gehört (Abb. 8-2). Ausgewählte Ergebnisse der BSRN-Arbeiten enthält Kapitel 3 dieses Heftes.

2.4 CEOP Referenzstation

Ausgehend von der Mitwirkung am Internationalen Ostseeprojekt BALTEX (dem europäischen Beitrag zu WCRP-GEWEX) ist das MOL seit 2002 eine von vier europäischen Referenzstationen (Abb. 8-3), welche die Bereitstellung umfangreicher Datensätze zu Landoberflächen- und Grenzschichtprozessen aus ihrem operationellen Messprogramm für das Projekt GEWEX-CEOP zugesagt haben. Das Ziel von CEOP (**C**o-ordinated **E**nhanced **O**bservation **P**eriod) besteht in der Erprobung des Prototyps eines zukünftigen globalen Erdbeobachtungssystems auf der Basis von Satellitendaten (u. a. TRMM, ENVISAT, ADEOS II, AQUA, TERRA) und den Messungen weltweit verteilter Referenzstationen (derzeit 36). Wissenschaftler des MOL haben an der Ausarbeitung von Festlegungen zu Datenumfang, Datenformaten und Regularien des Datenaustausches für das globale Netz der Referenzstationen mitgewirkt, Datensätze zur Charakterisierung von Grenzschicht- und Landoberflächenprozessen werden regelmäßig an das CEOP Central Data Archive in Boulder übermittelt. In Verbindung mit dem Jahrestreffen der *CEOP* Science Steering Group im April 2003 in Berlin wurden eine Exkursion an das MOL organisiert und den beteiligten Wissenschaftlern (vorwiegend aus dem asiatischen und amerikanischen Raum) die Messeinrichtungen in Lindenberg und Falkenberg vorgestellt. Ausgewählte Arbeiten der CEOP-Referenzstation am MOL sind in Kapitel 6 dieses Heftes dargestellt.

Abb. 8-2: Verteilung der BSRN-Stationen in Europa und Nahost. Das MOL (LIN) ist eine von 36 weltweiten und 8 operationellen (●) Stationen der RA VI. Die Stationen ZVE, BUD und JUN (▲) sind z. Zt. Kandidaten für das BSRN. Quelle: Nach WRMC (**W**orld **R**adiation **M**onitoring **C**enter).
ETH Zürich, Stand: Juli 2005.

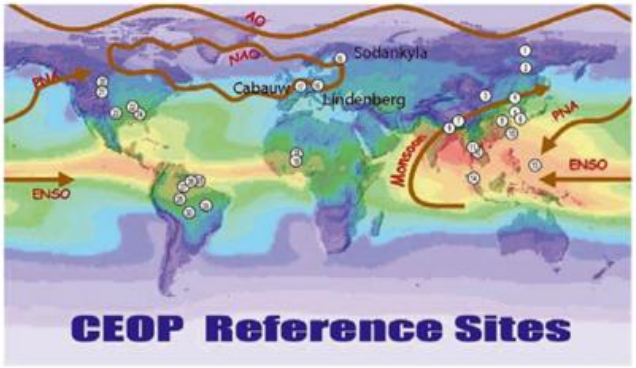


Abb. 8-3: Übersicht über die 36 GEWEX/CEOP Stationen. Quelle: http://monsoon.t.u-tokyo.ac.jp/ceop
CEOP project office, Stand Juli 2005.

2.5 GABLS Referenzstation

GABLS (**GEWEX** **A**tmospheric **B**oundary **L**ayer **S**tudies) ist ein internationales Projekt im Rahmen von GEWEX, das sich schwerpunktmäßig mit der Beschreibung der **A**tmosphärischen **G**renz**s**chicht (AGS) in regionalen und globalen Klima- und Wettervorhersagemodellen beschäftigt. GABLS wurde im Frühjahr 2001 durch das Science Steering Committee als offizielles Teilprojekt von GEWEX bestätigt. Das Hauptziel von GABLS besteht in der Verbesserung der Darstellung der AGS in numerischen Modellen auf der Basis des Verständnisses relevanter Prozesse. Die Aktivitäten von GABLS konzentrieren sich zunächst auf die stabile AGS, da es hier die größten Defizite in der adäquaten Darstellung in Modellen gibt und Aspekte der konvektiven AGS teilweise im Rahmen von **G**lobale **C**limate **C**ertificate **S**ystem (GCCS) behandelt werden. In der ersten Phase von GABLS wurden zunächst numerische Modellstudien mit **S**ingle **C**olumn **M**odell (SCM) – Versionen regionaler, numerischer Wettervorhersage – und Klimamodelle sowie Large-Eddy Simulationen durchgeführt. Der DWD und das KNMI (Niederländischer Wetterdienst) haben in Kooperation ein Verfahren zur Klassifikation von Profil-Messdaten zur Struktur der stabilen AGS an Datensätzen der Observatorien in Cabauw und Lindenberg erprobt. In der Folge sollen mit den Modellen Simulationen realer Fälle durchgeführt werden. Dabei wird mit Daten aus dem CASES-99 Experiment begonnen, wobei Daten aus LITFASS-2003 genutzt werden. Ausgewählte Beispiele dazu enthält Kapitel 6 dieses Heftes.

2.6 BALTEX Referenzstation

Im Rahmen von GEWEX gibt es zur Zeit fünf regionale Experimente, um regionale Aspekte des Energie-, aber insbesondere des Wasserkreislaufs zu untersuchen. Ein regionales Experiment wurde für die Ostsee (BALTEX – **Bal**tic Sea **Ex**periment) definiert. Für dieses Experiment stehen die Daten des Meteorologsichen Observatoriums Lindenberg seit 1995 zur Verfügung, auch wenn sie nicht Bestandteil des **B**ALTEX **M**eteorological **D**ata **C**enter (BMDC) sind. Seit 2003 ist die Datenbereitstellung bodennaher Daten (incl. turb. Flüsse) in CEOP aufgegangen und erfolgt kontinuierlich. Gemäß BALTEX Initial Implementation Plan hatte LITFASS-98 den Status eines *Cloud/Precipitation/Air – Land Surface Interaction Experiment*, und während LITFASS-2003 und dem BMBF-DEKLIM Forschungsprojekt EVA_GRIPS (**EVA**poration on **GRI**d and **P**ixel **S**cale) wurden als Beitrag zu Prozessstudien im Ostseeraum (BALTEX) intensive Messprogramme zur Bestimmung turbulenter Wärmeströme durchgeführt. Mittels der an den einzelnen Standorten bestimmten Wärmeflüsse konnten danach mit verschiedensten Verfahren flächengemittelte Wärmeströme errechnet und mit Modellergebnissen einerseits und Satellitendaten andererseits verglichen werden. Ausgewählte Beispiele sind in Kap. 6 dieses Heftes bzw. in einem in Vorbereitung befindlichen Sonderheft von *Boundary-Layer Meteorology*. Zukünftig wird der Standort Lindenberg weiter im Rahmen von BALTEX als Referenz für Atmosphärenmessungen zur regionalen Erdsystemmodellierung an Bedeutung gewinnen.

2.7 GUAN Referenzstation

Im Rahmen von GCOS (**G**lobal **C**limate **O**bserving **S**ystem) wurden vor mehr als 10 Jahren zwei Beobachtungssysteme mit dem Ziel einer umfassenden Klimabeobachtung eingeführt: GSN (**G**COS **S**urface **N**etwork) und GUAN (**G**COS **U**pper **A**ir **N**etwork). Diese Klimabeobachtungen zielen darauf ab, die Klimadiagnose einerseits und die Klimaprognose andererseits zu verbessern. Seit Januar 2004 ist Lindenberg eine von 161 weltweit und 13 europaweit eingerichteten Referenzstationen (Abb. 8-4). Die Station Lindenberg erfüllt bereits heute zusammen mit der SYNOP-GSN Station Lindenberg alle anspruchsvollen Ziele einer GUAN-Referenzstation: viermal täglicher Start einer Radiosonde mit einem Erreichen des 5 hPa-Niveaus, dem Start von Referenzsonden unter besonderer Berücksichtigung einer weltweit einzigartigen PTU-Referenzprüfkammer, sowie zusätzlicher Ozonsondierungen, und dem Vorhandensein einer BSRN-Referenzstation. Da die qualitativ hochwertigen Daten sehr vielfältig verwendet werden können, insbesondere für die Validierung von Satellitenprodukten der Feuchteprofile (BÜHLER et al. 2004), sollen weltweit 20 bis 40 Stationen zu speziellen Ankerstationen aufgewertet werden. Lindenberg wird eine von diesen Stationen sein (s. Kap. 4).

Abb. 8-4 Übersicht über die 161 GUAN-Stationen. Quelle: GCOS-Sekretariat, Stand: 01. Januar 2005.

2.8 ADM-Aeolus Entwicklungs-/Validierungsstation

Das Meteorologische Observatorium agiert hier als Entwicklungs- und Validierungsstation für die zukünftige ADM (**A**tmospheric **D**ynamic **M**ission), eine Kernmission des *Earth Explorer* Programmes der Europäischen Weltraumorganisation ESA. Bis zum Start des ESA-ADM Satelliten in 2007/8 werden zur Zeit Teilaspekte zur Bestimmung von atmosphärischen Windprofilen bearbeitet und Programme für die Satellitendatenanalyse vorbereitet. Die aktuellen Aufgaben am Observatorium beschränken sich auf die Validierung des zukünftigen satellitengestützten Doppler-Lidars. Zukünftig wird diese Arbeit erweitert, da die operationelle Validierung der Satellitenprodukte eine herausragende Rolle spielen wird.

2.9 EUMETNET-WINPROF Messstation

Seit einigen Jahren existiert in Europa ein flächendeckendes Messnetz mit verschiedensten Windprofiler-Messsystemen (s. Kap. 5). Der Deutsche Wetterdienst betreut davon gegenwärtig an zwei Messstandorten routinemäßig einen 482 MHz-Windprofiler/RASS-Komplex (Abb. 8-5). Ergänzt wird dieses Messnetz durch den 482 MHz-Forschungswindprofiler/RASS am Observatorium Lindenberg (der erste weltweit eingerichtete 13 x 13 m große Windprofiler) und einem in 2005 zu installierenden 482 MHz-Windprofiler/RASS-System in Bayreuth. Mit diesen Messkomplexen stehen Windprofile bis maximal 16 km mit einer vertikalen Auflösung von 500 m und die Profile der virtuellen Temperatur bis etwa 4 km mit einer 30-minütigen Auflösung zur Verfügung. Diese sind nicht nur in das europäische, sondern auch in das aerologische Messnetz des Deutschen Wetterdienstes eingebunden und die Daten selbst werden bereits für die Datenassimilation am EZMW verwendet. Anzumerken bleibt, dass zusätzlich am Meteorologischen Observatorium Lindenberg ein 1290 MHz-Windprofiler eingesetzt wird, um mit einer erhöhten vertikalen Auflösung von 100 m das Grenzschichtwindprofil zu erfassen.

Abb. 8-5: Übersicht über Windprofiler-Standorte des Projektes EUMETNET-WINPROF (4 DWD-Standorte in Lindenberg, Ziegendorf, Nordholz und Bayreuth, alle im Monitoring-Mode). Abbildung mit freundlicher Genehmigung des UK MetOffice. Stand: August 2005.

2.10 SUVMONET Messstation

Die an der DWD-Strahlungszentrale (s. Kap. 1 und 3) mit dem Bentham-Spektralradiometer gemessenen spektralen Bestrahlungsstärken im UV-Bereich werden im quasi-Echtzeit-Modus seit dem Jahre 2000 (Potsdam 2000–2003, Lindenberg ab 2003) an das Messnetz für solares UV-Monitoring (SUVMONET) weitergeleitet. Zu diesem nationalen Messnetz gehören die 4 Kernstationen des Bundesamtes für Strahlenschutz/Umweltbundesamt sowie 6 weitere assoziierte Stationen anderer Einrichtungen, die ebenfalls ihre Messwerte übertragen. Das im Rahmen dieses Messnetzes nach vereinheitlichten Kriterien in Lindenberg betriebene Bentham-Spektralradiometer stellt eine Brückenfunktion zu anderen im DWD betriebenen Typen von Spektralradiometern dar. Hauptziele des UV-Monitoring-Messprogramms sind die Bewertung der UV-Strahlung aus medizinischer und ökologischer Sicht, die Information der Öffentlichkeit über Richtlinien zum Schutz vor UV-Strahlung und über die aktuelle UV-Strahlenbelastung, sowie die Darstellung aktueller UV-Index-Messwerte aller Stationen und die Validierung der UV-Index-Vorhersagen.

2.11 SUVDAME/EDUCE Messstation

Die mit Brewer-Spektralradiometern an DWD-Observatorien gemessenen Spektren der solaren UV-Strahlung sowie andere für die UV-Strahlung relevante Parameter werden vom DWD seit 1996 im Rahmen der europäischen Forschungsprojekte SUVDAMA (**S**cientific **UV** **Da**ta **Ma**nagement) und EDUCE (**E**uropean **D**ata Base for **UV** **C**limatology and **E**valuation) am Finnischen Meteorologischen Institut (FMI) gespeichert. An dem letztgenannten, im Jahre 2003 abgeschlossenen Projekt waren mehr als 20 Institute aus 12 europäischen Staaten beteiligt. Wesentliche Komponenten des EDUCE beinhalteten die Datensammlung, Maßnahmen der Kalibrierung und Charakterisierung von Messgeräten, die Datenqualitätskontrolle sowie die Durchführung von „*Site Audits*“, in die auch die Strahlunsgzentrale des DWD einbezogen war. Die bis zum Beginn der 90er Jahre zurück reichende Datenbasis am FMI, zu der bisher 44 europäische Stationen von 37 Institutionen beigetragen haben, wird im Rahmen des im Jahre 2004 begonnenen europäischen Projekts SCOUT (**S**tratosphere-**C**limate Links with Emphasis **o**n the **UTLS**) fortgeführt und durch neue Messwerte ergänzt. Das Meteorologische Observatorium Lindenberg ist an dem Teil des Projektes SCOUT beteiligt, in dem qualitätskontrollierte Daten re-evaluiert und für die Ableitung der langzeitigen räumlichen Variabilität der UV-Strahlung sowie für die Untersuchung des Einflusses der Wolken und des Aerosols auf die Strahlung genutzt werden.

2.12 Ozon-Forschungssondierung

Seit 1975 werden am Meteorologischen Observatorium Lindenberg regelmäßig mindestens einmal wöchentlich Ozonsondierungen durchgeführt, wobei die Ozonsonde zusammen mit der Radiosonde gestartet wird und der Ozonpartialdruck bis in eine Höhe von 35 km mit einer Höhenauflösung von etwa 50 m gemessen wird. Für den Zeitraum 1975 bis Juni 1992 war die OSE-Sonde (eine in der ehemaligen DDR entwickelte Sonde vom Typ Brewer-Mast) die Standardsonde, seit März 1992 wird die ECC-Sonde für die Bestimmung des vertikalen Ozonprofils eingesetzt. Durch seine exponierte Lage (Grenze zum winterlichen arktischen Ozonloch) war und ist das Observatorium Lindenberg ein idealer Partner innerhalb einer Reihe von EU- und weltweiten Projekten, die sich mit dem Verständnis der Wirkung des Ozons und der Untersuchung und Modellierung des Ozonabbaus beschäftigen, z. B.: EASOE (**E**uropean **A**rctic **S**tratospheric **O**zone **E**xperiment 1991/92), SESAME (**S**econd **E**uropean **S**tratospheric **A**rctic and **M**idlatitude **E**xperiment 1994/95), THESEO (**Th**ird **E**uropean **S**tratospheric **E**xperiment on **O**zone 1996/2000), SOLVE (**S**tratospheric **O**zone **L**oss and **V**alidation **E**xperiment ab 1998) und QUOBI (**Qu**antitative understanding of **O**zone losses by **Bi**polar **I**nvestigations ab 2002). Die Ergebnisse der Lindenberger Messungen werden routinemäßig dem **W**orld **O**zone and **U**ltraviolet Radiation **D**ata **C**entre (WOUDC) zur Verfügung gestellt. Beispiele zu den Messungen bzw. Auswertungen sind im Kapitel 7 dargestellt.

3 Zukünftige Referenz

Auf Grund des sehr umfangreichen Beobachtungsprogramms am Meteorologischen Observatorium Lindenberg werden die Messungen zukünftig zur 4D Lindenberger Säule zusammengefasst werden und für weitere wissenschaftliche Fragestellungen zur Verfügung stehen. Neben der Weiterführung der oben genannten Messprogramme für die verschiedensten Referenzaufgaben wird eine wesentliche, weiterführende Aufgabe der Messungen am Observatorium zukünftig verstärkt die operationelle Validierung von Satellitenmessungen darstellen. So werden gegenwärtig schon Methoden für die Validierung der Windprofile der zukünftigen ESA Earth Explorer Mission ADM Aeolus (in Abschnitt 2.8 erläutert) entwickelt.

Zur Komplettierung der 4D Lindenberger Säule werden weiterhin ergänzend MSG SEVIRI-Satellitendaten analysiert werden, um Strahlungsflüsse am Oberrand der Atmosphäre und am Erdboden zu bestimmen. In der Kombination der Strahlungsmessungen an der BSRN Station und den Messungen des DWD-Strahlungsmessnetzes ist eine optimale Validierung der abgeleiteten Strahlungsflüsse möglich. Darüber hinaus werden die Strahlungsflüsse (gemessen und bestimmt aus den MSG SEVIRI-Daten) auch für die Validierung der im Rahmen der **C**limate **M**oritoring – **S**atellite **A**pplication **F**acility (CM-SAF) abgeleiteten Strahlungsflüsse genutzt werden, wobei als wesentliche Unterschiede zwischen 4D Lindenberger Säule und CM-SAF die räumliche (regional – Raum Lindenberg gegenüber global), als auch die zeitliche Auflösung (minütlich gegenüber stündlich) zu nennen sind.

Ein weiterer zukünftiger Schwerpunkt der Arbeiten am meteorologischen Observatorium ist die Bestimmung der Temperatur- und Feuchteprofile in wolkenfreien Atmosphären bzw. unterhalb von Wolken mit Hilfe des FTIR (**F**ourier **T**ransform **I**nterferometer) und der aus den Satellitendaten von MetOP - IASI abgeleiteten Profilen. Damit ist eine effiziente Validierung der Profile möglich und in Kombination der Messungen im Rahmen der GUAN-Referenz eine weitere, weltweit einzigartige Referenz gegeben. Für die Jahre 2011/2012 ist der Start der Satellitenmission ESA Earth Explorer Mission EarthCARE (**Earth C**louds **A**erosol and **R**adiation **E**xplorer) geplant. Nach der Bestätigung dieses zukünftigen Projektes eröffnet sich für das MOL mit seinen bodengebundenen Fernerkundungsdaten eine weitere Möglichkeit, den Observatoriumsstandort als Referenzstation zur Evaluierung von Wolken- und Aerosoleigenschaften aus Satellitendaten zu etablieren. Die dazu zu entwickelnden Verfahren können teilweise im Rahmen einer weiteren zukünftigen Satelliten-Mission (Cloudsat/Picasso – Start 2005/6) getestet und für die EarthCARE-Mission vorbereitet werden.

Ein wichtiger Aspekt zur Quantifizierung des lokalen Energie- und Wasserkreislaufes in der Region um Lindenberg ist die Bestimmung von Niederschlagsintensitäten aus kombinierten Bodenmessungen (Mikroregenradar, C-Band Radar Berlin und den Messungen des lokalen Lindenberger Ombrometermessnetzes) zur Evaluierung der Produkte der zukünftigen JAXA/NASA **G**lobal **P**recipitation **M**ission (GPM).

Literatur

ANSMANN, A., F. WAGNER, U. WANDINGER, I. MATTIS, U. GÖRSDORF, H.-D. DIER, J. REICHARDT, 1996: Pinatubo aerosol and stratospheric ozone reduction: Observations over central Europe. *J. Geophys. Res.* **101**(D13), 18775-18786, 10.1029/96JD01373.

BEYRICH, F., 2000: What can we learn from LITFASS with regard to the modelling of surface fluxes', Proc. BALTEX workshop on Parameterisation of surface fluxes, atmospheric boundary layer and ocean mixed layer turbulence for BRIDGE., Abisko, 20-21 June, 1999, Internat. BALTEX Secretariat: *BALTEX Publ.* No. **17**, 49-54.

BEYRICH, F., 2003: Lindenberg: One of the BALTEX reference sites for CEOP. *BALTEX-Newsletter* **5**, 5-8.

BEYRICH, F., J. BANGE, C. BERNHOFER, H. A. R. DE BRUIN, T. FOKEN, B. HENNEMUTH, S. HUNEKE, W. KOHSIEK, J.-P. LEPS, H. LOHSE, A. LÜDI, M. MAUDER, W. M. L. MEIJNINGER, R. QUECK, P. ZITTEL, 2004: LITFASS-2003 – a land surface/atmosphere interaction experiment: Energy and water vapour fluxes at different scales. in: H.-J. Isemer (Ed.): Proc. 4th Study Conference on BALTEX. Int. *BALTEX Secr. Publ.* No. **29**, 37-38 (ISSN 1681-6471).

BEYRICH, F., W. K. ADAM, 2004: CEOP Reference site data from Lindenberg: Be aware of terrain heterogeneity! in: H.-J. Isemer (Ed.): Proc. 4th Study Conference on BALTEX. *Int. BALTEX Secr. Publ.* No. **29**, 71-72 (ISSN 1681-6471).

BEYRICH, F.: 1999 'The LITFASS-Project of DWD: Status and Suggested Contribution to BRIDGE', Internat. BALTEX Secretariat: *BALTEX Publ. No.* **15**, A27-A29.

BEYRICH, F.; H.A.R DE BRUIN; H. LOHSE; S.H. RICHTER; U. WEISENSEE, 2001: Energy and water cycle components over a heterogeneous land surface: Status and results from LITFASS. J. Meywerk (Ed.): Proc. 3rd Study Conference on BALTEX – Mariehamn, Geesthacht: *International BALTEX Secr. Publ. No.* **20**, 21-22.

BEYRICH, F.; H.-J. HERZOG; J. NEISSER, 2002: The LITFASS project of DWD and the LITFASS-98 experiment: The project strategy and the experimental setup. *Theor. Appl. Climatol.* **73**, 3-18.

BEYRICH, F.; W. ADAM, 2004: A note on the use of CEOP reference site data for comparison with the output of global models: The Lindenberg example. *CEOP-Newsletter* **6**, 6-7.

BOSVELD F. C., F. BEYRICH, 2004: Classifying observations of stable boundary layers for model validation, AMS: 16th Symp. on Boundary Layers and Turbulence, Portland (ME) 9–14 August 2004, paper P4.13 (Extended Abstract on CD).

BÜHLER, S.A., M. KUVATOV, V.O. JOHN, U. LEITERER, H. DIER, 2004: Comparison of microwave satellite humidity data and radiosonde profiles: A case study. *J. Geophys. Res.* **109**, D13103.

ENGELBART, D., H. STEINHAGEN, U. GÖRSDORF, J. LIPPMANN, J. NEISSER, 1996: A 1290 MHz profiler with RASS for monitoring wind and temperature in the Boundary Layer. *Beitr. Phys. Atmos.* **69**(1), 63-80.

ESA, 1999: Atmospheric Dynamics Mission. ESA publication SP-1233, Vol. 4.

FEISTER, U., A. KAIFEL, R.-D. GREWE, J. KAPTUR, O. REUTTER, M. WOHLFART, K. GERICKE, 2003: First performance of results of two novel spectroradiometers developed for fast scanning of solar spectral UV irradiance. *SPIE.* **5156**, 123-134.

FEISTER, U., E. JÄKEL, K. GERICKE, 2002: Parameterization of daily solar global ultraviolet irradiation. *Photochem. Photobiol.* **76**, 281-293.

INGMANN, P., J. FUCHS, J. PAILLEUX, A. STOFFELEN, 2000: The Atmospheric Dynamics Mission. *ESA Earth Observation Quarterly*, No **66**, 12-17.

OHMURA, A. et al, 1997: Baseline Surface Radiation Network (BSRN/WCRP): New Precision Radiometry for Climate Research. *Bull. Amer. Soc.* **79**, 2115-2136.

RANDALL, C. E., J. D. LUMPE, R. M. BEVILACQUA, K.W. HOPPEL, M. D.FROMM, R. J. SALAWITCH, W. H. SCHWARTZ, S. A. LLOYD, E. KYRO, P. VON DER GATHEN, H. CLAUDE, J. DAVIS, H. DEBACKER, H. DIER, M. J. MOLYNEUX, J. SANCHO, 2002: Reconstruction of three-dimensional ozone fields using POAM III during SOLVE. *J. Geophys. Res.* **107**, No. D20, 8299, 10.1029/2001JD00471.

STEINHAGEN, H., J. DIBBERN, D. ENGELBART, U. GÖRSDORF, V. LEHMANN, J. NEISSER, J. W. NEUSCHAEFER, 1998: Performance of the first European 482 MHz wind profiler radar with RASS under operational conditions. *Meteorol. Z.* **7**, 248-261.

SCHULZ, A., M. REX, N. R. P. HARRIS, G. O. BRAATHEN, E. REIMER, R. ALFIER, I. KILBANE-DAWE, S. ECKERMANN, M. ALLAART, M. ALPERS, B. BOJKOV, J. CISNEROS, H. CLAUDE, E. CUEVAS, J. DAVIES, H. D. BACKER, H. DIER, V. DOROKHOV, H. FAST, S. GODIN, B. JOHNSON, B. KOIS, Y. KONDO, E. KOSMIDIS, E. KYRÖ, Z. LITYNSKA, I. S. MIKKELSEN, M. J. MOLYNEUX, G. MURPHY, T. NAGAI, H. NAKANE, F. O'CONNOR, C. PARRONDO, F. J. SCHMIDLIN, P. SKRIVANKOVA, C. VAROTSOS, C. VIALLE, P. VIATTE, V. YUSHKOV, C. ZEREFOS, P. VON DER GATHEN, 2001: Arctic ozone loss in threshold conditions: Match observations in 1997/1998 and 1998/1999. *J. Geophys. Res.* **106**(D7), 7495-7504, 10.1029/2000 JD900653.

STEINMETZ, M., 2003: Solar UV measuring network in Germany. *Radiation Protection* **38** 4, 2003.

VASARAS, A., A. F. BAIS, U. FEISTER, C. S. ZEREFOS, 2001: Comparison of two methods for cloud flagging of spectral UV measurements. *J. Atmos. Res.* **57**(1), 31-42.

WMO, 1999: The WCRP / GEWEX Global Water Vapor Project (GVaP): Science Plan. Publ. 27, Internat. GEWEX Project Office, 1001 Wayne Ave., Silver Spring, Md. 20910, 50 S.

WMO, 1999: The WCRP/GEWEX Global Water Vapor Project (GVaP): Implementation Plan. Publ. 32, Internat. GEWEX Project Office, 1001 Wayne Ave., Silver Spring, Md. 20910, 46 S.

WRCP / GEWEX, 2001: Coordinated Enhanced Observing Period (CEOP) – Implementation Plan. *IGPO Publication Series*, No. **36**, 113 S.

promet, Jahrg. 31, Nr. 2–4, 178-181 (Oktober 2005)
© Deutscher Wetterdienst 2005

Blick nach draußen

Das ‚Instituto Nacional de Meteorología' (INM) – Der Spanische Wetterdienst –

The Spanish Weather Service

Geschichtlicher Überblick

Der Ursprung der Meteorologie als behördliche Einrichtung in Spanien wird auf das Jahr 1860 datiert, obwohl schon lange davor an einer Reihe von Standorten meteorologische Beobachtungen vorgenommen wurden. Das *Instituto Central Meteorológico* [Meteorologisches Zentralinstitut] wurde 1887 als Vorläufer des heutigen *Instituto Nacional de Meteorología* (INM) gegründet und gab bereits 1893 regelmäßig Wetterkarten und Vorhersagen heraus. Die ursprüngliche Zentrale im Retiro Park in der Stadtmitte Madrids beherbergt auch heute noch eine der Außenstellen des Nationalen Meteorologischen Instituts (INM).

Bis 1906 wurden die Aufgaben der Wetterbeobachtung und -vorhersage mit anderen Einrichtungen gemeinsam wahrgenommen, ab dann war das INM allein für alle meteorologischen und klimatologischen Aufgaben gegenüber der spanischen Regierung verantwortlich. Allerdings verblieben die meisten Wetterwarten noch für einige Jahre in den Händen der Universitäten bzw. anderer Kooperationspartner des INM.

Zu einer bedeutenden Veränderung kam es dann in der Zeit zwischen 1910 und 1920, als die spanische Regierung aufgrund einer u. a. von Deutschland angeführten Initiative aus dem Jahre 1909 ein meteorologisches Observatorium in den Bergen der Kanarischen Insel Teneriffa einrichtete. Für die Führung dieses Observatoriums wurde zusätzliches Personal benötigt, woraufhin im Jahre 1913 das Cuerpo de Meteorólogos del Estado [Korps der Staatsmeteorologen] eingerichtet wurde. An verschiedenen Orten wurden regelmäßige aerologische Beobachtungen aufgenommen. Im gleichen Jahr wurde ein Netz von ehrenamtlichen Klimastationen eingerichtet, das auch heute noch erfolgreich betrieben wird. In dem Jahrzehnt nach 1920 veranlasste das INM die Gründung eigener Wetterwarten und Regionalbüros im ganzen Land.

Um 1932 nahm die schnelle Entwicklung im Bereich der Luftfahrt entsprechenden Einfluß auf den Nationalen Wetterdienst, der unter neuem Namen der *Dirección General de Aeronáutica* [Generaldirektion für Luftfahrt] angegliedert wurde. Während des Bürgerkriegs zwischen 1936 und 1939 betrieben die beiden Kontrahenten jeweils einen eigenen Wetterdienst. Nach der Wiedervereinigung wurde der Wetterdienst dem militärisch-orientierten Ministerium für Luftfahrt unterstellt, das in den frühen 40er Jahren eine intensive Zusammenarbeit mit dem Reichswetterdienst unterhielt. Lange Jahre war die Unterstützung der zivilen und militärischen Luftfahrt die Hauptaufgabe des Wetterdiensts. Nichtsdestotrotz erhielt das INM auch die

Abb. 1: „Die Burg", ursprüngliche Zentrale des INM im Retiro Park in Madrid um 1900.

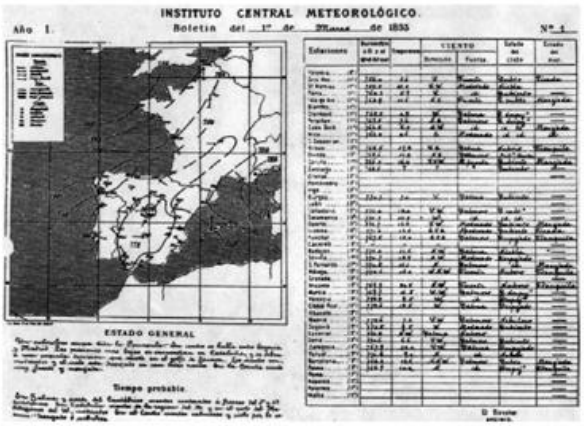


Abb. 2: Das erste Wetterbulletin vom 1. März 1893.

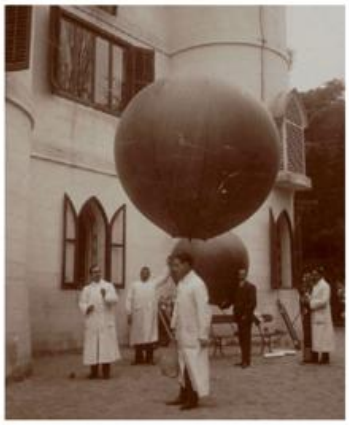


Abb. 3: Ballonaufstieg zur Sondierung der Atmosphäre am Retiro Observatorium im Jahre 1914.

enge Verbindung zu den Universitäten aufrecht und die Forschung gewann in einigen Bereichen an Bedeutung. Erste Versuche zur numerischen Wettervorhersage wurden bereits im Jahre 1966 mit Installation des ersten Computers durchgeführt.

Diese militärische Orientierung endete 1978: Der spanische Wetterdienst wurde dem Transportministerium unterstellt und erhielt seinen heutigen Namen *Instituto Nacional de Meteorología* (INM) [Nationales Meteorologisches Institut]. Eine umfangreiche Erneuerung der technischen Ressourcen erfolgte in den 1980ern mit der Installation der automatischen Stationen und des Wetterradarnetzes sowie der Neuorganisation der Vorhersagedienste. 1996 wurde das INM dem neuen Umweltministerium unterstellt.

Aufgaben und Aufbauorganisation

Heute hat das INM den Status einer Generaldirektion im Geschäftsbereich des spanischen Umweltministeriums. Gemäß Königlichem Dekret ist das INM mit der Erfüllung der Aufgaben des spanischen Staates im Bereich Meteorologie und Klimatologie einschließlich der allgemeinen Wetterinformationen für das gesamte Staatsgebiet betraut. Das INM trägt die alleinige Verantwortung für die grundlegende meteorologische Infrastruktur in ganz Spanien sowie für den internationalen Austausch von Daten, die Dienstleistungen im Bereich der Luft- und Schifffahrt und die meteorologischen Spezialdienstleistungen für Verteidigungszwecke.

Das Direktorium, die zentrale Verwaltung sowie die meisten der Fachabteilungen haben ihren Sitz in der Zentrale des INM in Madrid. Das INM ist in vier Hauptabteilungen gegliedert:

- *Beobachtungssysteme:* Beobachtungen (herkömmliche Verfahren und Fernerkundung), Instrumente, Infrastruktur und Betrieb, Telekommunikation und Datenverarbeitung,
- *Vorhersage:* operationelle Meteorologie einschließlich Basisvorhersage und Forschungstätigkeiten, numerische Wettervorhersage, Spezialdienstleistungen für Luftfahrt und Verteidigung usw.,
- *Klimatologie und klimatologische Anwendungen:* Klimadatenbank, Klimaforschung, Agrarmeteorologie, hydrologische und umweltrelevante Anwendungen, Kontakt zu den Zivilschutzbehörden,
- *Verwaltung:* Finanzen und Verwaltung, Personalwesen, kommerzielle Aufgaben und Bildungszentrum (dem auch die Aufgaben der Dokumentation, Veröffentlichungen und Bibliothek obliegen).

Die Pressestelle und das Referat für Internationale Angelegenheiten unterstehen direkt dem Generaldirektor des INM.

Regionale Struktur

Das INM verfügt über 15 auf dem gesamten Festland und den Inseln verteilte Regionalzentralen. Jede Regionalzentrale ist für lokale Dienststellen zuständig (96 Wetterwarten, wovon einige mit Sonderaufgaben betraut sind, 31 Flugwetterwarten an zivilen Flughäfen und 23 Militärwetterwarten an Luftstützpunkten und sonstigen militärischen Einrichtungen). Darüber hinaus gibt es in Madrid eine Zentralstelle für Spezialdienstleistungen für Verteidigungszwecke.

Abb. 4: Die Zentrale des INM in Madrid in unmittelbarer Nähe zum Stadtzentrum.

Abb. 5: Francisco Cadarso, Generaldirektor des INM.

11 der 15 Regionalzentralen erbringen Vorhersagedienste über eine *Grupo de Predicción y Vigilancia* (GPV) [Vorhersage- und Beobachtungsgruppe]. Diese GPVs sind für die meisten Informations- und Vor-

Abb. 6: Geographische Verteilung der 15 Regionalzentralen des INM.

hersagedienste innerhalb ihrer Einzugsgebiete zuständig, einschließlich der Dienste für die Flughäfen vor Ort.

Beobachtungsnetze

Zusätzlich zu den 96 bemannten Wetterwarten (synoptische und aerologische Daten, Luftfahrt- und Spezialdaten usw.) verfügt das INM über etwa 250 automatische Stationen. Es besteht ein Verbund von 14 Wetterradaren mit Doppler-Systemen sowie ein Blitzortungsnetz. Zusätzliche Beobachtungen durch freie oder ehrenamtliche Mitarbeiter erfolgen an etwa 4.000 Standorten im ganzen Land.

Abb. 7: Neue Wetterwarte des INM in Lugo/Galizien.

Personal und Haushalt

Die Gesamtzahl der Beschäftigten belief sich 2004 auf etwas über 1.600. Davon sind etwa 450 in der Zentrale und 1.150 in den Regionalzentralen und lokalen Standorten beschäftigt. Die meisten Mitarbeiter werden über Einstellungsverfahren der nationalen Verwaltung gewonnen und haben Beamtenstatus. Darüber hinaus wird auch noch anderes Personal verpflichtet, allerdings hauptsächlich für Hilfsdienstleistungen und in einigen Fällen für Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten. Für die Besetzung von über 600 der derzeitigen Stellen wurden Universitätsabschlüsse vorausgesetzt.

Der Etat des INM für das Jahr 2005 hat zum ersten Mal einen Betrag von 100 Millionen Euro erreicht. Etwa 40 Millionen davon entfallen auf die Gehälter des Personals und fast 22 Millionen sind für die Zahlung der Finanzbeiträge Spaniens zu internationalen Organisationen erforderlich.

Dienstleistungen für Nutzer

Viele unterschiedliche Personen, Behörden, Organisationen, Firmen usw. fragen für ihre Anwendungen nach Daten, Vorhersagen oder Spezialdienstleistungen des INM. Die Allgemeinheit wird mit zeitgerechten Mitteilungen in den Medien, wie z. B. Fernsehen, Radio und Presse, versorgt. Es gibt nationale und lokale Telefondienste, die die Wetterlage und die allgemeine Vorhersage durchgeben. Eine reiche Palette von Wetterinformationen und Vorhersagen werden über die Internetseiten des INM verbreitet (www.inm.es). Für spezielle Bereiche wie Luft- und Seefahrt, Landwirtschaft, Industrie, Handel usw. werden Spezialdienstleistungen angeboten: z. B. steht an allen Flughäfen für die Flugzeug-Crews und Luftfahrtgesellschaften ein automatisches Briefing-System zur Verfügung und auch für maritime Zwecke gibt es ein automatisches Kommunikationssystem. Die Herausgabe von Warnungen vor gefährlichen Wetterereignissen erfolgt in enger Zusammenarbeit zwischen dem INM und den Zivilschutzbehörden. Gemäß nationalen und internationalen Bestimmungen erhebt das INM Nutzungsgebühren für solche Dienstleistungen, die nicht für die Erfüllung der nationalen Aufgaben notwendig sind. Allerdings verfolgt das INM eine Politik der kostenfreien Datenverbreitung und des regen Kontakts zur Öffentlichkeit durch Ausstellungen, Veröffentlichungen, Internet oder andere Kommunikationswege.

Forschung und Entwicklung

Das INM widmet einen bedeutenden Teil seiner Ressourcen wissenschaftlichen und technischen Aktivitäten sowohl im Hinblick auf die Verbesserung der Qualität seiner Dienste als auch im Rahmen seiner Kernaufgaben als öffentliche Einrichtung im Bereich der Forschung auf den Gebieten der Atmosphären- und Umweltforschung. Zu diesem Zweck wird auf verschiedenen Gebieten mit Universitäten und anderen nationalen sowie internationalen Einrichtungen zusammengearbeitet.

Abb. 8: Straßenstand des INM beim „Tag des Buches" in Barcelona.

Abb. 9: Stand auf der Wissenschaftsmesse auf Menorca.

Das INM betreibt derzeit einen vektoriellen CRAY Supercomputer mit einer Spitzengeschwindigkeit von 2.400 Gigaflops, der für die numerische Wettervorhersage und andere Anwendungen eingesetzt wird. Das INM ist Mitglied der HIRLAM-Gruppe (**H**igh **R**esolution **L**imited **A**rea **M**odel) und arbeitet derzeit an diversen Programmen mit, wie. z. B. dem Programm zur kurzfristigen Ensemblevorhersage, an dem auch das EZMW beteiligt ist.

Abb. 10: Der Direktor und Vizedirektor des EZMW mit Mitarbeitern des INM vor dem Supercomputer des INM.

Das INM ist auch stark in internationalen Projekten in anderen Bereichen der Meteorologie engagiert, z. B. in dem Satelliten-Auswertezentrum (SAF) für Nowcasting von EUMETSAT, das bei dem INM in Madrid angesiedelt ist, oder in dem MEDEX-Programm zur meteorologischen Forschung im Mittelmeerbecken unter der Leitung der INM-Regionalzentrale auf Mallorca. Das Meteorologische Observatorium in Izaña ist eine der Basisstationen der Global Atmosphere Watch und vieler anderer internationaler Netze; dort werden zahlreiche Projekte und Experimente zu den physikalischen und chemischen Prozessen in höheren Luftschichten durchgeführt. Seit Gründung der Station im Jahre 1916 bestehen wichtige Kooperationen mit wissenschaftlichen Instituten in Deutschland. Das INM betreibt auch das meteorologische Observatorium auf der spanischen Basis in der Antarktis.

Abb. 11: Das Meteorologische Observatorium in Izaña/Teneriffa (28° Nord, nahe der afrikanischen Küste in einer Höhe von 2.400 m)

Internationale Aktivitäten

Das INM vertritt Spanien bei zwischenstaatlichen meteorologischen Organisationen, wie z. B. der Weltorganisation für Meteorologie (WMO), dem Europäischen Zentrum für Mittelfristige Wettervorhersage (EZMW) und EUMETSAT (der Europäischen Organisation zur Nutzung von meteorologischen Satelliten). Die Beiträge Spaniens zu diesen Gremien werden alle aus dem Budget des INM bezahlt. Das INM ist auch bei den meteorologischen Gremien der ICAO (Organisation für internationale Zivilluftfahrt) und der NATO sowie bei weiteren zwischenstaatlichen Organisationen vertreten. Das INM beteiligt sich auch zunehmend an den Aktionsplänen „Gruppe für Erdbeobachtung" (GEO) und „Globale Umwelt- und Sicherheitsüberwachung" (GMES).

Eine maßgebliche Beteiligung seitens des INM besteht auch bei einer Reihe von internationalen Kooperationen mit anderen, vorwiegend europäischen Wetterdiensten, z. B. ECOMET, EUMETNET, EU-Projekte usw. Das INM ist Mitglied der HIRLAM-Gruppe (einem Verbund der Nationalen Wetterdienste der nordischen Länder, der Niederlande und Irlands zum Zweck der gemeinsamen Arbeit im Bereich der numerischen Wettervorhersage) und setzt Versionen des HIRLAM-Modells für die operationelle Kurzfrist-Vorhersage ein. Gleichzeitig führt das INM in vielen unterschiedlichen Bereichen bilaterale Kooperationen mit den Nationalen Wetterdiensten und anderen Organisationen aus Frankreich, Portugal, Marokko, Deutschland sowie anderen europäischen und nordafrikanischen Ländern durch.

Darüber hinaus ist das INM aufgrund der intensiven historischen und kulturellen Verbindungen auch stark in der Zusammenarbeit mit den lateinamerikanischen Ländern engagiert. Das INM hat bei der Gründung der Konferenz der Leiter der lateinamerikanischen Wetter- und hydrologischen Dienste Pate gestanden und leitet sogar dessen Sekretariat. Eines der Ziele dieser Konferenz ist der Start des Lateinamerikanischen Programms für die Zusammenarbeit auf den Gebieten der Meteorologie und Hydrologie.

Das Trainingszentrum des INM organisiert seit Jahrzehnten ein renommiertes Internationales Trainingsseminar für Meteorologie, das den offiziellen WMO-Richtlinien entspricht und für meteorologisches Personal vorwiegend aus Lateinamerika, Nordafrika und Osteuropa bestimmt ist. Darüber hinaus werden bei den Fachdienststellen arbeitsbegleitende Praktika für Mitarbeiter aus dem Ausland organisiert.

Der Ausblick

Nach 117 Jahren der Geschichte des *Instituto Nacional de Meteorología* ist nun die Zeit einer kontinuierlichen Innovation gekommen, um mit den Strömen der sich verändernden Welt durch neue Aktivitäten und neue Akteure im internationalen sowie nationalen Bereich mithalten zu können. Eine der Neuerungen wird die Anpassung an die föderale Struktur eines sich zunehmend dezentralisierenden Landes sein. Eine andere besteht in der Reaktion auf Umweltbedürfnisse, die über das rein Meteorologische hinausgehen. Das INM ist zuversichtlich, dass es diese Herausforderungen meistern und weiterhin der spanischen Gesellschaft eine Referenz sowie der internationalen Gemeinschaft der Meteorologie ein loyaler Partner sein wird.

Anschrift des Autors:
Manuel Palomares
Servicio de Relaciones Internacionales (International Relations Department)
Instituto Nacional de Meteorología
Apartado 285
Madrid 28071, Spain
Tel +34 91 581 9735
Fax +34 91 581 9896
E-Mail: palomares@inm.es

promet, Jahrg. 31, Nr. 2–4, 182-185 (Oktober 2005)
© Deutscher Wetterdienst 2005

Institute stellen sich vor

Das Institut für Meteorologie und Klimatologie der Universität Hannover

The Institute of Meteorology and Climatology of the University of Hannover

Zusammenfassung
Das Fach Meteorologie hat in Hannover eine über 70-jährige Tradition. Das seit 1949 bestehende Institut verfügt heute über vier Professuren und mit Doktoranden und Diplomanden über insgesamt 30 Mitarbeiter. Die aktuellen Forschungsgebiete umfassen Verkehrsmeteorologie, Wolken-, Blitz- und Niederschlagsforschung, atmosphärische Dynamik, Strahlung, Satellitenvalidierung sowie Turbulenz- und Grenzschichtforschung. Zur Zeit besuchen insgesamt rund 100 Studierende die Lehrveranstaltungen des Instituts.

Abstract
Meteorology has an over 70-year long tradition in Hannover. The institute was founded in 1949 and houses four Professors and has 30 members of staff incl. PhD and diploma thesis students. Current research fields are traffic meteorology, clouds, lightning and precipitation, atmospheric dynamics, radiation and satellite validation as well as turbulence and boundary-layer research. Currently, about 100 students attend the classes held by the institute.

Geschichte des Instituts

Die Geschichte des Instituts beginnt mit dem Wirken von Prof. Dr. H. Seilkopf als Lehrbeauftragter für Meteorologie für Bauingenieure in den 30er Jahren des 20. Jahrhunderts. Die eigentliche Gründung eines Instituts für Meteorologie, Klimatologie und Gewächshauslehre erfolgte am 1.4.1949 in Sarstedt an der Hochschule für Gartenbau und Landeskultur. Die Leitung hatte von 1949 bis 1959 Prof. Dr. phil. habil. W. Grundmann inne, der zuvor schon Direktor des durch die Kriegswirren aufgelösten Instituts für Angewandte Meteorologie und Meteorologische Messtechnik der Technischen Hochschule Braunschweig war. Aus den Beständen dieses Instituts wurde das verbliebene Inventar übernommen. Die meteorologischen Forschungsaufgaben orientierten sich vorwiegend an den Bedürfnissen des Gartenbaus.

Im Jahr 1950 erfolgte dann der Umzug nach Herrenhausen in die Räume der Fakultät für Gartenbau und Landeskultur. Dort wurde 1951 mit den auch heute noch durchgeführten klimatologischen Messungen[1] begonnen. Die Umbenennung in Institut für Meteorologie und Klimatologie 1952 brachte das Engagement in der klimatologischen Forschung zum Ausdruck.

Mit der Berufung von Prof. Dr. phil. W. Dammann (1961–1974) begann eine Phase der Expansion. Das Personal wurde deutlich aufgestockt, ein 50 m hoher Messmast auf dem Universitätsgelände in Herrenhausen errichtet und die Instrumentierung erweitert.

Die Berufung von Prof. Dr. R. Roth (1975–1999) brachte dann, der allgemeinen Entwicklung der Meteorologie folgend, im Jahre 1980 die Eingliederung des Instituts in den Fachbereich Physik im Rahmen der Neuorganisation der Universität. Die Theoretische Meteorologie wurde 1979 mit der Berufung von Prof. Dr. D. Etling verstärkt, während seit 1990 die Belange des Umweltschutzes durch Prof. Dr. G. Groß vertreten werden. Die experimentelle Ausrichtung der Forschung gewann neuen Aufschwung mit Prof. Dr. T. Hauf als Nachfolger von Prof. Roth und der Neuberufung von Prof. Dr. G. Seckmeyer im Jahre 2000 für den Schwerpunkt Strahlung.

Seit dem 1. April 2005 ist das Institut nun Teil der neu gegründeten Fakultät für Mathematik und Physik der Universität Hannover.

Am Institut arbeiten heute insgesamt 22 Wissenschaftler (davon 7 auf Planstellen, 15 auf Drittmittelstellen und als Doktoranden) und 7 technische und Verwaltungsmitarbeiter. Zusätzlich sind 5–10 Diplomanden am Institut tätig. Neben 16 Büros für Mitarbeiter und zwei Laboren stehen dem Institut für die Lehre ein Seminarraum für etwa 20 Personen, ein Praktikumsraum, ein Computerraum und der „Wetterraum" zur Verfügung. Experimentelle Arbeiten und Messpraktika nutzen eine Dachplattform, das Messfeld Herrenhausen sowie das externe Messgelände in Ruthe bei Sarstedt, das etwa 30 km südlich von Hannover liegt.

Abb. 1: Das Gebäude des Instituts für Meteorologie und Klimatologie in Hannover-Herrenhausen.

[1] http://www.muk.uni-hannover.de/meteo/messreihe/klima_lnx.html

Forschung

Das Institut gliedert sich in 5 Forschungsgruppen, die sowohl experimentelle als auch theoretisch-modellierende Themen bearbeiten. Aus der Vielzahl der durchgeführten Forschungsprojekte werden hier einige wenige Beispiele exemplarisch vorgestellt:

Allgemeine Meteorologie

Leitung: Prof. Dr. T. Hauf
Themen: Verkehrsmeteorologie, Niederschlagsprognose, Wolken- und Blitzforschung

Flugzeugvereisung als Beispiel aus der *Verkehrsmeteorologie*: Unterkühltes Wasser wird im gesamten Temperaturbereich bis –40 °C beobachtet und stellt eine signifikante Gefahr für die Luftfahrt dar. Sowohl gefrierende Wassertröpfchen mit Durchmessern um 20 µm als auch Nieseltröpfchen mit Durchmessern von 50 bis 200 µm können auf Flugzeugen im Einzelfall zu Eisanwachsraten von 4 mm/min führen. Technische Maßnahmen wie Heizen oder mechanisches Absprengen des Eises reichen oftmals nicht aus, um die Flugfähigkeit zu erhalten, so dass Bedarf für eine spezifische Vereisungswarnung besteht. In Zusammenarbeit mit DLR und DWD wurde ADWICE als Warn- und Vorhersageverfahren zur Erkennung vereisungsgefährdeter Lufträume entwickelt. ADWICE befindet sich zur Zeit in einer intensiven operationellen Testphase an den Luftfahrtberatungszentralen des DWD. Im Rahmen des EU-geförderten Industrieprojektes FLYSAFE soll für jeden Flug das Vereisungsrisiko berechnet und direkt zu den Piloten ins Cockpit gesendet werden.

Abb. 2: Starker Eisansatz an der Vorderkante der Tragfläche einer Do-228.

Beispiel *Blitzforschung*: Blitze sind das charakterisierende Merkmal von Gewittern und ihre Häufigkeit ist ein Indikator für die Intensität anderer Unwettererscheinungen wie Hagel, Starkniederschlag oder Sturmböen. Blitze, die aus den Wolken in den Boden einschlagen, werden in Deutschland hinreichend gut erfasst. Die wesentlich häufigeren wolkeninternen Entladungen werden dagegen bislang wenig beachtet. Ein vom Institut für Meteorologie und Klimatologie aufgebautes Messnetz in Norddeutschland schließt seit Sommer 2003 diese Lücke. Da die wolkeninternen Entladungen im Verlaufe der Gewitterentwicklung grundsätzlich vor den ersten Wolke-Boden-Blitzen auftreten, können entstehende Gewitter früher erkannt werden – ein wichtiger Zeitgewinn bei der Gewitterwarnung.

Das Potenzial dieser neuen Informationen wird zur Zeit in einem Projekt des DFG Schwerpunktprogramms zur quantitativen Niederschlagsprognose untersucht. Die aktuelle Gewitterlage kann auf der Webseite des Instituts eingesehen werden (http://www.muk.uni-hannover.de/safir/blitze.html).

Strahlung

Leitung: Prof. Dr. G. Seckmeyer
Themen: Solare Strahlung, Fernerkundung, UV-Messtechnik, Prognose des Strahlungsklimas

Beispiel *Strahlungsmessungen* in der Antarktis: In dem von der DFG geförderten Projekt CASE (Characterization of the specific solar radiation conditions in polar regions with respect to climate change and ozone depletion) sollten die spezifischen Strahlungsbedingungen in der Antarktis untersucht werden. Dazu wurden zunächst Modellrechnungen des Strahlungstransfers unter Berücksichtigung der sehr hohen Bodenalbedo in der Antarktis durchgeführt. Es ergab sich eine deutliche Erhöhung der horizontnahen spektralen Strahldichte gegenüber nicht schneebedeckten Flächen. Diese Modellrechnungen wurden später in einer mehrmonatigen Messkampagne auf der deutschen Antarktis-Station Neumayer weitgehend bestätigt, es gab aber insbesondere im solaren Infrarotbereich auch signifikante Abweichungen zwischen Messung und Rechnung, die einer weiteren Klärung bedürfen. Außerdem wurden erstmals spektral hochaufgelöste Messungen der spektralen Albedo durchgeführt. Dabei ergaben sich insbesondere im UV und kurzwelligen sichtbaren Bereich Bodenalbeden von nahezu 1, d. h. der Schnee hat einen höheren Reflektionsgrad als alle sonst bekannten Materialien.

Abb. 3: Strahlungsmessungen in einem Container an der deutschen Antarktisforschungsstation Neumayer.

Qualitätssicherung bei Strahlungsmessungen: Das EU-Projekt QASUME (Quality Assurance of Spectral Ultraviolet Measurements in Europe through the development of a transportable unit, http://lap.physics.auth.gr/QASUME) soll die Qualitätssicherung und Langzeitstabilität der UV-Messungen an den verschiedenen Messstationen für ultraviolette Strahlung in Europa garantieren. Dazu wurde ein transportables Spektralradiometer entwickelt, das in internationalen Kampagnen der Vergleichbarkeit der weltweit eingesetzten Radiometer dient.

Erste Vergleichsmessungen fanden im Jahr 2002 in Ispra/Italien und in Ruthe auf dem Messfeld des Institutes statt, wo die Messungen unter Teilnahme von Studenten im Fortgeschrittenenpraktikum durchgeführt wurden. Ein wesentlicher Beitrag unseres Institutes zu QASUME war die Entwicklung und der Bau einer transportablen Kalibriereinheit, die inzwischen erfolgreich bei der Qualitätssicherung der UV-Messungen in Europa eingesetzt wird.

Atmosphärische Dynamik

Leitung: Prof. Dr. D. Etling
Themen: Dynamik der Atmosphäre, Wirbeldynamik und Strömungstankexperimente

Beispiel *Laborexperimente*: Wirbel von verschiedener Größe und Stärke sind Hauptbestandteile des Wettergeschehens. Hauptursache ihrer Entstehung ist das Zusammentreffen warmer und kalter Luftmassen, wobei die Erdrotation eine wichtige Rolle bei der Ausbildung von Zyklonen (Tiefdruckgebiete) spielt. Die Wirbelbildung in der Atmosphäre kann man auch in vereinfachter Form in Laborexperimenten nachvollziehen. Statt Luft verwendet man Wasser; der Temperaturkontrast wird durch Dichteunterschiede mittels Salzlösungen ersetzt. Um die Erdrotation zu simulieren, muss das mit der Versuchsflüssigkeit gefüllte Gefäß auf eine rotierende Scheibe, etwa wie beim Plattenspieler, gesetzt werden.

Der mit einem Durchmesser von 13 m größte rotierende Wassertank der Welt steht im Labor CORIOLIS in Grenoble, Frankreich. Dort wurden im Rahmen eines EU-Projektes Laborexperimente zur Zyklonenbildung durchgeführt. Durch systematische Variation von Dichteunterschieden und Rotationsperiode des Tanks wurde versucht, die einzelnen physikalischen Effekte der Wirbelbildung herauszufinden. Eine Momentanaufnahme eines solchen Versuchs ist in der Abbildung gezeigt.

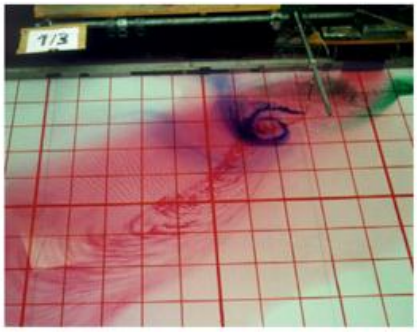


Abb. 4: Laborexperiment zum Studium der Wirbelbildung im Wassertank. Die entstehenden Strukturen sind ähnlich zu großräumigen atmosphärischen Wirbeln wie z. B. Tiefdruckgebieten.

Abb. 5: Die Lärmbelastung durch den Straßenverkehr kann mit numerischen Modellen für die verschiedensten auftretenden Wetterlagen berechnet werden.

Die Durchführung der Experimente erfolgte durch Studenten der Meteorologie im Rahmen von Praktika und Diplomarbeiten, so dass hier eine Verknüpfung von Forschung und Ausbildung erfolgen konnte.

Angewandte Meteorologie

Leitung: Prof. Dr. G. Groß
Themen: Regionale Klimaänderung, Windenergie, Ausbreitung von Lärm, Schadstoffen und Gerüchen

Beispiel *Ausbreitung von Gerüchen*: Bei bestimmten Wetterlagen oder Windrichtungen können vielerorts plötzlich mitunter starke Geruchsbelästigungen auftreten. Die Verursacher können oftmals nicht unmittelbar ausgemacht werden. Um einerseits die Emittenten von Luftverschmutzung eindeutig zu ermitteln und andererseits zukünftige Belastungen schon im Planungsstadium abschätzen zu können, wurde ein numerisches Modell speziell für die Ausbreitung von Luftschadstoffen und Gerüchen entwickelt. Die Ausbreitung lässt sich für den Zeitraum eines ganzen Jahres berechnen, so dass die gesamte Variationsbreite der atmosphärischen Bedingungen berücksichtigt werden kann. Die Ergebnisse solcher Rechnungen bieten die Grundlage zur Umsetzung verschiedener EU-Richtlinien und nationaler Vorschriften.

Beispiel *Verkehrslärm*: Bei Planung und Bau jeder neuen Straße oder Eisenbahntrasse, genau wie bei der Installation eines jeden neuen Anflugverfahrens, muss heute zuvor zwingend die Lärmbelastung für die Anwohner berechnet werden. Oftmals müssen dabei komplizierte meteorologische Prozesse und komplexe Geländeformen behandelt werden. Mit Standardverfahren ist dies in der Regel nicht zufriedenstellend möglich. Deshalb wurde ein Modell zur Berechnung der Ausbreitung von Schall in der Atmosphäre entwickelt. Dabei erfolgt eine Kopplung zwischen einem meteorologischen Vorhersagemodell und einem Modell zur Schallausbreitung. Damit ist es möglich, die komplexen Ausbreitungspfade von Schall unter der Wirkung variierender atmosphärischer Gegebenheiten und Bodeneigenschaften zu berechnen.

Turbulenz- und Grenzschichtforschung

Leitung: PD Dr. S. Raasch
Themen: Parallelisierte Grobstrukturmodellierung, Strukturbildung in konvektiven Grenzschichten, Simulation von Turbulenzmessungen, hochauflösende Gebäudeumströmung.

Beispiel *Leistungssteigerung durch paralleles Rechnen*: Trotz der starken Zunahme der Rechenkapazität in den letzten 50 Jahren stellt die begrenzte Leistungsfähigkeit der Rechner immer noch eine deutliche Limitierung für meteorologische Simulationen dar. Will man turbulente atmosphärische und ozeanische Strömungen in einer ausreichenden Auflösung simulieren, um wenigstens die größten Wirbel aufzulösen (Large Eddy Simulation, LES), so ist man heute immer noch auf einen der weltweit wenigen verfügbaren Höchstleistungs-Rechner angewiesen. In Deutschland sind dies Massivparallelrechner des Norddeutschen Verbundes für Hoch- und Höchstleistungsrechner (HLRN) in Hannover und Berlin, sowie entsprechende Anlagen am Deutschen Klimarechenzentrum (DKRZ) in Hamburg und am John von Neumann Institut für Computing (NIC) am Forschungszentrum Jülich. Die Vorteile dieser Großrechner können aber nur ausgeschöpft werden, wenn die Simulationsmodelle für den Einsatz auf Massivparallelrechnern mit mehreren hundert Prozessoren geeignet und optimiert sind. Ein solches Modell, das **PA**rallelisierte **LES-M**odell PALM, wurde seit Ende der neunziger Jahre am Institut entwickelt und ist weltweit eines der ersten seiner Art. Im Sommer 2003 erreichte PALM auf 192 Prozessoren einer NEC-SX6 am Deutschen Klimarechenzentrum für ein Modellgebiet von 2300 x 2300 x 500 Gitterpunkten erstmals eine Rechengeschwindigkeit im Teraflop-Bereich. Das Modell war eines der wenigen Benutzerprogramme, deren Benchmark-Ergebnisse für die Auswahl der 2002 neu beschafften Re-

chenanlage des Norddeutschen Verbundes für Hoch- und Höchstleistungsrechner (HLRN) herangezogen wurden.

Das Modell PALM wird auch von Forschergruppen der Yonsei-University, Seoul, Südkorea, und des Tokyo Institute of Technology eingesetzt. Mit PALM können nun Probleme untersucht werden, die bisher wegen ungenügender Rechenleistung nicht behandelbar waren.

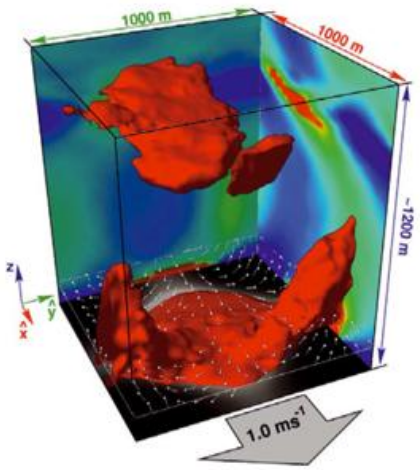


Abb. 6: Ergebnis einer Turbulenzsimulation. In einem Kubus von 1 km x 1 km x 1,2 km der Atmosphäre bildet sich bei leichtem Wind von 1,0 m/s über einer warmen Oberfläche, etwa einer offenen Wasserfläche im Eis, eine Warmluftblase (in rot), die überraschenderweise nicht in der Mitte, sondern an der Seite in zwei Zipfeln aufsteigt.

Studium

Das Meteorologiestudium ist in Hannover, wie auch an anderen Standorten, sehr stark mit dem der Physik verzahnt. Typischerweise werden die Lehrveranstaltungen im Grundstudium von 30–50 Studierenden der Meteorologie, Physik, Mathematik, Geographie und anderer Fächer besucht. Insgesamt hat der Studiengang Meteorologie etwa 100 Studierende, die Anzahl der Erstsemester liegt bei etwa 50 Studienanfängern. Die Jahrgangsstärke nach dem Vordiplom liegt mit leicht zunehmender Tendenz bei 6 bis 10. Die Einführung eines Bachelor- und Masterstudiengangs für das Fach Meteorologie ist zum Wintersemester 2006/07 geplant.

Die Ausbildung in synoptischer Meteorologie soll an dieser Stelle besonders hervorgehoben werden: Private Wetterfirmen und auch der Deutsche Wetterdienst (DWD) haben Bedarf an gut in der klassischen Wettervorhersage ausgebildeten Meteorologen. Die Ausbildung am Institut trägt diesem Bedarf in besonderer Weise Rechnung.

Das Institut verfügt über einen „Wetterraum", in dem allen Studierenden und allen Mitarbeitern umfangreiche meteorologische Daten zugänglich sind. Dies sind weltweite Beobachtungs- und Vorhersagedaten, die vom DWD dankenswerterweise für Lehr- und Forschungszwecke zur Verfügung gestellt werden und mit dem DWD-eigenen Meteorologischen Applikations- und Präsentationssystem (MAP) und unter Einsatz eines Beamers visualisiert werden können. Darüber hinaus werden auch institutseigene Daten wie z. B. vom Blitzortungsnetz und vom Wolkenhöhenmesser verwendet. Eine Auswahl der Daten ist auf den Internetseiten des Institutes dargestellt (http://www.muk.uni-hannover.de/meteo/meteo.html). Ein meteorologisches Messfeld komplettiert die synoptische Ausstattung.

Die synoptische Ausbildung der Studierenden umfasst Vorlesungen mit zugehörigen Übungen, die durch einen aus der Praxis kommenden Lehrbeauftragten durchgeführt werden. Die praktische Umsetzung des erlernten meteorologischen Wissens erfolgt in zwei einwöchigen intensiven „Wetterbesprechungen" eines jeden Studenten, die von den Dozenten und wissenschaftlichen Mitarbeitern betreut werden. Darin werden detaillierte Analysen des aktuellen Wetters durchgeführt sowie graphisch aufbereitete Prognosen für die nächsten 36 Stunden erstellt. Täglich wird das Wetter in Form einer kleinen Besprechung institutsintern vorgetragen und diskutiert.

Nachwuchsarbeit

Um das Interesse an der Meteorologie bei zukünftigen Studierenden frühzeitig zu wecken, wird der Zusammenarbeit mit Schulen und dem Kontakt mit Schülern eine hohe Bedeutung zugemessen. In einer großen Zahl von Beratungs- und Informationsveranstaltungen der Universität sowie bei Praktikumsaufenthalten können die Schüler eigene Erfahrungen sammeln. Damit sollen interessierte Schüler rechtzeitig über die Inhalte und Anforderungen eines Studiums und die in der Regel sehr guten Berufsaussichten informiert werden. Auch falsche Vorstellungen über das Studium können so korrigiert werden. Ziel ist es, den Übergang von der Schule zum Studium zu erleichtern, indem die Schüler bereits während der Schulzeit an den Universitätsbetrieb und an universitäre Arbeitsweisen herangeführt werden.

Im Rahmen dieser Bemühungen beteiligt sich das Institut unter anderem an den jährlich stattfindenden Hochschulinformationstagen (für Schüler der 11. und 12. Klasse) und der Herbst- und Winter-Uni. Beide ermöglichen einen Einblick in den Universitätsbetrieb und Gespräche mit den Studierenden. Die Herbst-Uni richtet sich speziell an Schülerinnen, nicht zuletzt, um den Frauenanteil in den Naturwissenschaften zu erhöhen.

Das *Formel X-Programm* bildet den Rahmen der Zusammenarbeit mit mehreren Gymnasien. Dabei werden von Dozenten des Instituts Vorträge in den Leistungskursen gehalten, Facharbeiten betreut und AGs an den Schulen unterstützt. Hier werden die Schüler auch direkt in aktuelle Forschungsarbeiten des Instituts einbezogen. Interessierten Schulen wird der direkte Zugang zu den Daten des Blitzortungssystems gegeben.

Anschrift der Autoren:

Dr. Clemens Drüe,
Prof. Dr. D. Etling,
Prof. Dr. G. Groß,
Prof. Dr. T. Hauf,
PD Dr. S. Raasch,
Prof. Dr. G. Seckmeyer
Institut für Meteorologie und Klimatologie
Herrenhäuser Straße 2
30419 Hannover
Telefon: (+49) 511 762-2677
Telefax: (+49) 511 762-4418
E-Mail:
sekretariat@muk.uni-hannover.de
http://www.muk.uni-hannover.de

promet, Jahrg. 31, Nr. 2–4, 186-190 (Oktober 2005)
© Deutscher Wetterdienst 2005

E. RUDOLPH

Einfluss sehr hoher Abflüsse auf die Wasserstände in der Tideelbe

Influence of fresh water discharge on the water levels along the Unterelbe

Zusammenfassung
Die Wasserstände in der Tideelbe werden sowohl durch die Gezeitendynamik und den Wind über der Nordsee als auch durch den Oberwasserzufluss aus der Oberen und Mittleren Elbe bestimmt. In einer Sensitivitätsstudie wird die Bedeutung des Oberwasserzuflusses für die Wasserstände entlang der Tideelbe untersucht. Der Einsatz numerischer Modelle ermöglicht es, extreme, noch nie beobachtete Oberwasserereignisse zu untersuchen, sie mit mittleren Tiden und Sturmfluten zu kombinieren und ihren Einfluss auf das Hochwasser zu analysieren. Für die Tideelbe können Bereiche identifiziert werden, in denen die Wasserstände durch Variationen im Oberwasser unterschiedlich stark beeinflusst werden.

Abstract
Water levels along the Elbe Estuary are not only caused by wind and tide of the North Sea but also by the fresh water discharge from the river Elbe. A sensitivity study is used to understand the influence of the fresh water discharge on water levels along the Elbe estuary. The use of numerical models allows to examine even extreme discharge events, that have never been observed. They are combined with tides and storm surges in order to analyse the effect on water levels. Along the Elbe estuary areas can be identified where the water levels are sensitive to changes in fresh water discharge.

Einleitung

Die beobachtete Erwärmung der Atmosphäre geht einher mit einer Zunahme des Wasserdampfgehaltes der Troposphäre. Diese Veränderung des Klimasystems äußert sich in einem intensivierten Wasserkreislauf und in stärkeren Niederschlagsereignissen. In den mittleren und hohen Breiten der nördlichen Hemisphäre wird zusätzlich eine Zunahme der Niederschlagsmenge beobachtet (ALBRITTON und MEIRA FILHO 2001). Extreme Niederschlagsereignisse in den Einzugsgebieten der in die Nordsee mündenden Flüsse können zu extremen Oberwasserereignissen in den tidebeeinflussten Flussmündungsgebieten führen. So erzeugten die außergewöhnlich hohen Niederschläge über Böhmen und dem Erzgebirge im August 2002 einen Oberwasserzufluss Q in die Tideelbe von bis zu 3425 m³/s. Für den Küstenschutz ist es somit von Interesse, den Einfluss extremer, noch nicht beobachteter Oberwasserereignisse auf die Wasserstände entlang der Tideelbe zu untersuchen.

Der Einsatz hydrodynamisch-numerischer Modelle ermöglicht, sowohl historische Situationen als auch bisher nicht beobachtete extrem hohe Oberwasserszenarien in der Tideelbe zu untersuchen. Diese Vorgehensweise erlaubt, den Einfluss des Oberwassers auf das Hochwasser (HW) zu analysieren (BAW 2000). Die Bedeutung des Oberwasserzuflusses auf die Höhe der Hochwasserstände entlang der Tideelbe wird für drei Situationen mit unterschiedlich hohen Wasserständen untersucht: mittlere Tiden, Sommerfluten und Sturmfluten.

1 Die Tideelbe und ihr Einzugsgebiet

Die Elbe ist mit einer Länge von 1100 km und einem Einzugsgebiet von 150000 km² der viertgrößte Fluss Mittel- und Westeuropas. Sie fließt von der Elbequelle im Riesengebirge durch das Böhmische Becken und das Elbsandsteingebirge in das Norddeutsche Tiefland und mündet bei Cuxhaven in die Nordsee. Zum Einzugsgebiet der Elbe gehören Mittelgebirge wie Teile des Böhmerwaldes, das Erzgebirge, das Fichtelgebirge oder der Harz, und Tiefebenen wie das Böhmische Becken sowie das Mittel- und Norddeutsche Tiefland. Einen detaillierten hydrologisch-geographischen Überblick gibt z. B. die **I**nternationale **K**ommission zum **S**chutz der **E**lbe (IKSE 2001).

Das Abflussregime der Elbe ist durch einen hohen Abfluss im Winterhalbjahr (November bis April: MQ = 850 m³/s) und durch geringen Abfluss im Sommer (Mai bis Oktober: MQ = 565 m³/s) gekennzeichnet. Über 60 % des mittleren Jahresabflusses fließen im Winterhalbjahr ab. Jedoch können extreme Niederschlagsereignisse im Sommerhalbjahr über dem Elbeeinzugsgebiet abweichend von der langjährigen Statistik zu hohen Oberwasserabflüssen auch im Sommer führen. Im August 2002 benötigte die durch die extremen Niederschläge vom 11. bis 13. August 2002 über Böhmen, dem Erzgebirge und dem Harz entstandene Hochwasserwelle (Ablauf eines Hochwasserereignisses längs eines Fließgewässers) etwa 5 Tage, um die etwa 500 km von Dresden bis Geesthacht (IKSE 2004) zurückzulegen.

Das tidebeeinflusste Flussmündungsgebiet der Elbe reicht von der Mündung bei Cuxhaven (Elbe km 725) etwa 140 km stromauf bis zur Tidegrenze am Wehr Geesthacht (Elbe km 586). Die Tideelbe verengt sich von 15 km Breite bei Cuxhaven auf 3 km bei Brunsbüttel (Elbe km 695) und auf 300 m bei Geesthacht (Abb. 1 oben). Im Mündungsbereich ist die Elbe mehr als 20 m tief. Zwischen der Mündung und Hamburg ist die Tideelbe gleichzeitig die Seeschifffahrtsstraße zum Hafen Hamburg. Die

Fahrrinnentiefe der Elbe ist in diesem Bereich an die nautischen Anforderungen angepasst und hat heute eine Tiefe von NN–16 m. Stromauf von Hamburg St. Pauli (Elbe km 625) nimmt die Tiefe deutlich ab und erreicht am Wehr Geesthacht NN–5 m (Abb. 1 unten).

Die Wasserstände in der Tideelbe werden sowohl durch die Gezeitendynamik der Nordsee und dem Wind über Nordsee und Deutscher Bucht als auch durch den Oberwasserzufluss aus der Oberen und Mittleren Elbe bestimmt. Tab. 1 gibt einen Überblick über charakteristische Oberwasserereignisse am Abflusspegel Neu Darchau (Elbe km 536).

2 Untersuchungskonzept

Die Bedeutung des Oberwasserzuflusses Q für die Höhe der Hochwasserstände entlang der Tideelbe wird für drei unterschiedliche Situationen untersucht:

1. *Astronomische Tide:* nur durch die Astronomie beeinflusste Tide, hier Spring-Zeitraum;
2. *Sommerflut:* Sturmflut außerhalb der Sturmflutsaison (September bis April), hier 21.August 1990;
3. *Bemessungssturmflut:* Synthetische Sturmflut, die den Bemessungswasserstand erreicht, hier Bemessungssturmflut 2085A (LÄNDERARBEITSGRUPPE 1988).

Der Einsatz hydrodynamisch-numerischer (HN-) Modelle ermöglicht es, Systemstudien durchzuführen. Die drei genannten Situationen werden mit extremen Oberwasserszenarien kombiniert, um den Einfluss des Oberwassers auf die Wasserstände entlang der Unterelbe zu analysieren. In einer systematischen Untersuchung werden extreme Oberwasserereignisse von 2000 m³/s, 3000 m³/s, 4000 m³/s, 5000 m³/s sowie 6000 m³/s betrachtet. Diese Szenarien werden im folgenden mit Q2000, Q3000, Q4000, Q5000 und Q6000 bezeichnet. Abflüsse größer als 2150 m³/s bei Sturmfluten und 3620 m³/s bei mittleren Tiden wurden in der Unterelbe bisher nicht (zuverlässig) beobachtet (DEUTSCHES GEWÄSSERKUNDLICHES JAHRBUCH 1998).

Für die hier vorgestellten Untersuchungen wird das 2-dimensionale mathematische Verfahren TRIM-2D (CASULLI 1990 bzw. BAW 1998) verwendet. Die dabei verwendete Modelltopographie gibt den Zustand der Tideelbe des Jahres 2002 wieder. Bei Sturmfluten und Oberwasserereignissen größer 1100 m³/s wird das Wehr Geesthacht gelegt und trennt somit nicht mehr die Tideelbe von der Mittelelbe. Das Modellgebiet reicht deshalb über das Wehr Geesthacht hinaus bis Bleckede (Elbe km 550). Zur Modellierung von Wasserstand und Strömung während der Bemessungssturmflut benötigt das HN-Modell zur Bestimmung des Impulseintrages aus der Atmosphäre Informationen zu Windrichtung und Windgeschwindigkeit über der Tideelbe. Dieser räumlich und zeitlich hochaufgelöste lokale Wind ergibt sich aus der großräumigen Wetterlage und wird kleinräumig durch die Topographie und die Oberflächenrauhigkeit des Geländes modifiziert. Die zur Modellierung der Bemessungssturmflut benötigten Windfelder wurden vom DWD GF Seeschifffahrt mit dem 3-dimensionalen hydrostatischen Windmodell MKW (SCHMIDT und PÄTSCH 1992) berechnet.

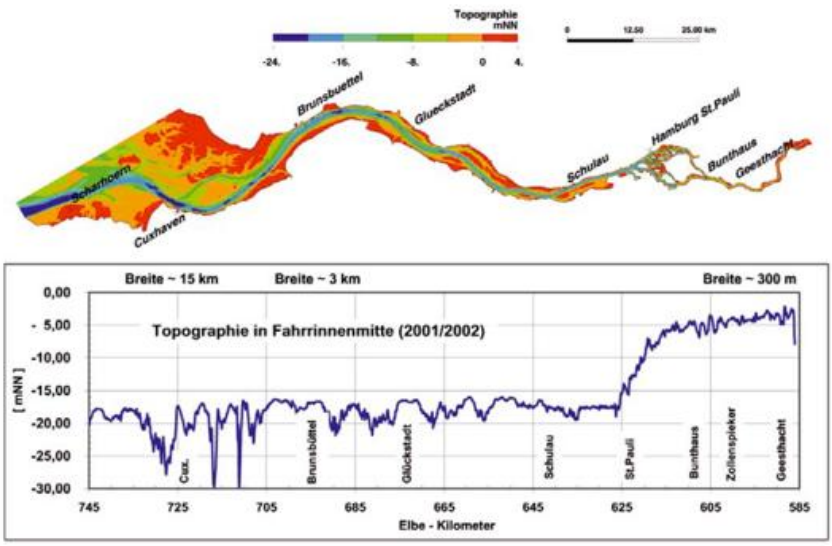


Abb. 1: Topographie der Tideelbe von der Mündung bei Cuxhaven bis zur Tidegrenze am Wehr Geesthacht (oben) sowie Tiefe der Tideelbe in Fahrrinnenmitte (unten). Die Lage der im Text erwähnten Orte ist gekennzeichnet.

100jährliches Ereignis HQ100 Neu Darchau	4000 m³/s
HHQ (Höchster bekannter Abfluss) Neu Darchau (April 1940)	3620 m³/s
MNQ (Mittlerer niedrigster Abfluss) Neu Darchau	280 m³/s
MQ (Mittelwert des Abflusses) Neu Darchau	720 m³/s
Abfluss Neu Darchau während Sturmflut 3.1.1976	500 m³/s
Abfluss Neu Darchau Bemessungssturmflut 2085A (definiert)	2200 m³/s
Abfluss Neu Darchau während Sommerflut 21.8.1990	200 m³/s
Elbehochwasser 2002:	
HQ (Höchster Abfluss) Neu Darchau 22.8.2002	3425 m³/s
HQ (Höchster Abfluss) Dresden 17.8.2002	4700 m³/s

Tab. 1: Oberwasserereignisse der Elbe bei Neu Darchau (Elbe km 536) bzw. Dresden (Elbe km 55) (DEUTSCHES GEWÄSSERKUNDLICHES JAHRBUCH 1998).

3 Fallstudie „Astronomische Tide“

Die Bedeutung des Oberwasserzuflusses auf die Höhe der Wasserstände bei mittleren Tiden entlang der Tideelbe wird durch eine Systemuntersuchung bestimmt. Die astronomische Tide für Cuxhaven (Elbmündung) wird aus 19 Partialtiden durch harmonische Gezeitenberechnung (PANSCH 1989) ermittelt und

zur Steuerung des Wasserstandes am seeseitigen Rand des numerischen Modells verwendet. Beispielhaft wird die astronomische Tide des 28.1.1994 ohne Wind modelliert und der Oberwasserzufluss variiert. Abb. 2 zeigt den Wasserstandsverlauf am 28.1.1994 bei Elbe km 630 (Hamburg) für die fünf genannten Oberwasserszenarien sowie für das mittlere niedrigste Oberwasser MNQ = 280 m³/s. Man erkennt deutlich, dass mit zunehmendem Oberwasser sowohl das Tideniedrigwasser (Tnw) als auch das Tidehochwasser (Thw) ansteigt. Auch die Eintrittszeiten von Tnw und Thw verändern sich in Abhängigkeit vom Oberwasser. Mit zunehmendem Oberwasserabfluss verkürzt sich die Flutphase und die Ebbe verlängert sich.

Das Ergebnis der Analyse von Hochwasser (HW) und Niedrigwasser (NW) entlang der Tideelbe ist in Abb. 3 dargestellt. Der Einfluss des Oberwassers ist im Bereich zwischen Wehr Geesthacht und Hamburg St. Pauli deutlich zu erkennen. In St. Pauli (Elbe km 623N) erkennt man eine Zunahme des HW um 10 cm pro 1000 m³/s Oberwasserzunahme. Bei Zollenspieker (Elbe km 600) beträgt die entsprechende Zunahme des HW 55 cm. Der Vergleich mit dem Bemessungswasserstand (Abb. 5) zeigt, dass selbst für diese extremen Oberwasserszenarien das HW stets unter dem Scheitelwasserstand der Bemessungssturmflut bleibt. Für das Oberwasserszenario MNQ beträgt der Tidehub bei Cuxhaven etwa 3,50 m und bei Zollenspieker 2,50 m. Für die extremen Oberwasserszenarien nimmt der Tidehub zwischen St. Pauli und Geesthacht deutlich ab und beträgt bei Geesthacht für Q6000 nur noch 20 cm. Zwischen St. Pauli und Brunsbüttel (Elbe km 695) nimmt der Einfluss des Oberwassers auf die Wasserstände deutlich ab. Stromab des Seehafens Hamburg ist die Elbe deutlich breiter und tiefer als stromauf. Im breiten und tiefen Mündungsbereich der Elbe stromab von Brunsbüttel ist der Einfluss des Oberwassers auf die Wasserstände nicht nachweisbar.

Die Analyse der querschnittsintegrierten Durchflüsse entlang der Unterelbe verdeutlicht die Bedeutung der Oberwassermenge im Verhältnis zum tidebedingten Durchfluss. Abb. 4 zeigt für die astronomische Tide des 28.1.1994 die querschnittsintegrierten Durchflüsse für das Oberwasserszenario MNQ (280 m³/s) und Q4000. Bei Cuxhaven werden tidebedingt sowohl bei Ebbe als auch bei Flut über mehrere Stunden Durchflüsse größer als 40000 m³/s erreicht. Ein zusätzliches Oberwasser von 4000 m³/s spielt hier nur eine untergeordnete Rolle. In Hamburg oder in Zollenspieker jedoch liegt ein Oberwasserzufluss von 4000 m³/s in der gleichen Größenordnung wie die tidebedingten Durchflüsse.

4 Fallstudie „Sommerflut 1990“

Eine Tide in der Elbe wird als Sturmflut definiert, falls der Windstau in Cuxhaven ≥ 2 m oder das HThw ≥ MThw + 1,50 m beträgt (GÖNNERT und SIEFERT 1998). Am 21.8.1990 wurde in Cuxhaven ein Wasserstand von NN + 3,01 m und in Hamburg St. Pauli NN + 4,17 m erreicht.

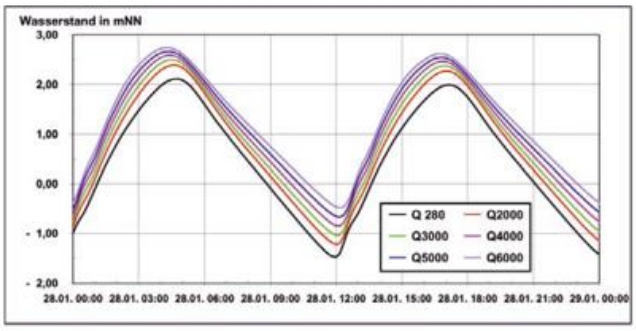


Abb. 2: Wasserstandsentwicklung für die astronomische Tide des 28.1.1994 bei Elbe km 630 (Hamburg) für einen Oberwasserabfluss von MNQ (280 m³/s) sowie den extrem hohen Oberwasserabflüssen 2000 m³/s, 3000 m³/s, 4000 m³/s, 5000 m³/s und 6000 m³/s.

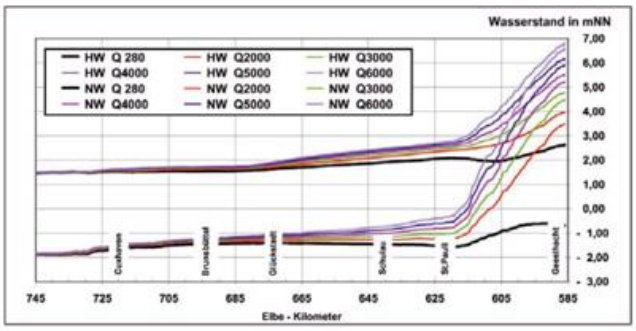


Abb. 3: Hochwasser und Niedrigwasser entlang der Tideelbe für die astronomische Tide des 28.1.1994 mit einem Oberwasserabfluss von MNQ (280 m³/s) sowie den extrem hohen Oberwasserabflüssen 2000 m³/s, 3000 m³/s, 4000 m³/s, 5000 m³/s und 6000 m³/s.

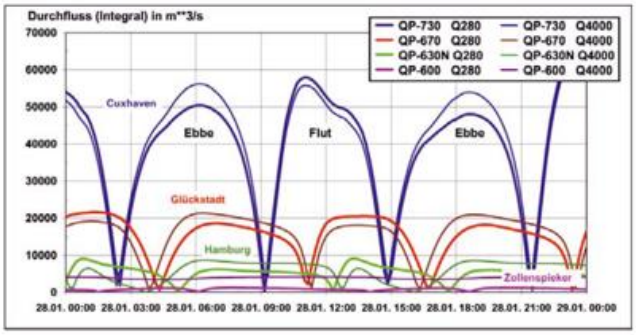


Abb. 4: Querschnittsintegrierter Durchfluss für die astronomische Tide 28.1.1994 für die Oberwasserszenarien Q280 und Q4000 entlang der Tideelbe für Querprofile (QP) bei Elbe km 730 (Cuxhaven), Elbe km 670 (Glückstadt), Elbe km 630 (Hamburg) und Elbe km 600 (Zollenspieker).

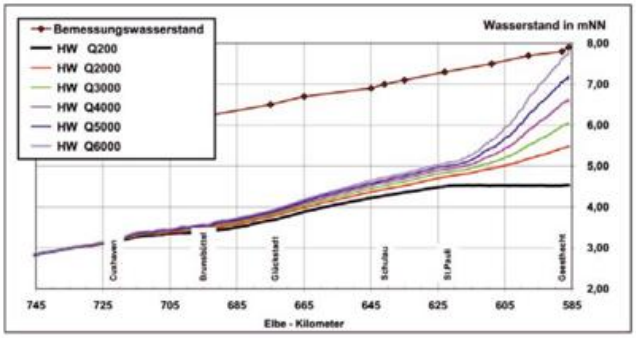


Abb. 5: Sturmflutscheitelwasserstand entlang der Tideelbe für die Sommerflut mit den Oberwasserszenarien MNQ, Q2000, Q3000, Q4000, Q5000 und Q6000. Zum Vergleich ist der Bemessungswasserstand eingezeichnet.

Der maximale Windstau in Cuxhaven betrug 2,75 m. Tab. 2 gibt einen Überblick über charakteristische Wasserstände in Cuxhaven, Hamburg und Zollenspieker.

Im August 1990 betrug der Oberwasserzufluss in die Elbe 200 m³/s. Der Wind erreichte im Elbmündungsgebiet auf Scharhörn 25 m/s. Auch für dieses Ereignis wird der Einfluss extremer Oberwasserabflüsse auf das Hochwasser entlang der Tideelbe untersucht. Man erkennt in Abb. 5 den größten Einfluss des Oberwassers im Bereich zwischen Hamburg und Geesthacht. Bei Zollenspieker (Elbe km 600) steigt der Sturmflutscheitelwasserstand um etwa 30 cm pro 1000 m³/s. Stromab von Hamburg wird der Oberwassereinfluss deutlich geringer und ist im Mündungsbereich stromab von Brunsbüttel kaum sichtbar. Auch für dieses Szenario zeigt die Analyse der querschnittsintegrierten Durchflüsse, dass erst stromauf von Hamburg tide- und oberwasserbedingte Durchflüsse die gleiche Größenordnung erreichen. In diesem Bereich werden auch für eine Sommerflut bei extremen, jedoch noch nie beobachteten Abflüssen (> 5000 m³/s) Wasserstände in der Größenordnung des Bemessungswasserstandes erreicht.

5 Fallstudie „Bemessungssturmflut 2085 A“

Die Bemessungssturmflut 2085 A wurde 1985 von einer LÄNDERARBEITSGRUPPE (1988) erarbeitet. Die maßgebende Sturmtide wird aus der Addition der mittleren Tidekurve und einer extremen Windstaukurve gebildet. Für diese synthetische Bemessungssturmflut ist die Wasserstandsentwicklung für Cuxhaven sowie die Windentwicklung über der Unterelbe definiert. Als Oberwasserzufluss sind für die Bemessungssturmflut 2200 m³/s festgelegt. Dies entspricht dem aufgerundeten höchsten zuverlässig bei einer Sturmflut gemessenen Wert oder auch 2/3 des höchsten bekannten Abflusses, dabei wurde in Tab. 1 die übliche Bezeichnung HHQ (DIN 4049-3) verwendet. Aus den Sturmflutscheitelwasserständen HW der Bemessungssturmflut ergeben sich die Bemessungswasserstände entlang der Tideelbe, die wiederum Grundlage für die Deichhöhen sind. Die HW der Bemessungssturmflut liegen bei Cuxhaven um 55 cm und in Hamburg um 85 cm höher als die höchsten je gemessenen Wasserstände (Tab. 2). Es ist festgelegt, dass im Abstand von 10 Jahren sowohl das Verfahren selbst als auch dessen Grundlage anhand neuer Daten und Erkenntnisse überprüft werden muss. Aufgrund des Ergebnisses der Überprüfung im Jahre 1996 sah die Arbeitsgruppe keine Veranlassung, die Sturmfluttide, das Oberwasser oder das Windszenario der Bemessungssturmflut 2085 A zu verändern (SIEFERT 1998).

In einer Systemstudie wird der Einfluss extrem hoher Abflüsse auf die Sturmflutscheitelwasserstände der Bemessungssturmflut untersucht. Der Oberwasserzufluss wird auf 3000 m³/s, 4000 m³/s, 5000 m³/s und 6000 m³/s erhöht. Abb. 6 zeigt die Sturmflutscheitelwasserstände sowohl für die Bemessungssturmflut als auch für die vier genannten extremen Oberwasservariationen. Wie für die astronomische Tide und die Sommerflut ist auch hier der Einfluss des Oberwassers auf die Wasserstände stromauf von Hamburg St. Pauli am größten. Bei dieser extrem hohen Sturmflut ergibt sich eine Zunahme des Scheitelwasserstandes von 10 cm pro 1000 m³/s in St. Pauli und um 20 cm pro 1000 m³/s in Zollenspieker. Auch die LÄNDERARBEITSGRUPPE (1988) gibt einen Einfluss des Oberwassers auf die Wasserstände in dieser Größenordnung an: St. Pauli 1 dm pro 1000 m³/s und Zollenspieker 1 bis 2,5 dm pro 1000 m³/s.

Während der Bemessungssturmflut werden tidebedingt im Mündungsbereich Durchflüsse größer als 80000 m³/s berechnet. Im Bereich von Hamburg werden mehr als 8000 m³/s erreicht. Bei den sturmflutbedingten sehr großen Werten ist der Anteil des Oberwasserzuflusses im Verhältnis kleiner als bei astronomischen Tiden. Für das gleichzeitige Zusammentreffen der extrem hohen Bemessungssturmflut mit einem extrem hohen, noch nie beobachteten Oberwasserereignis werden stromauf von Hamburg Wasserstände von bis zu 1 m über dem Bemessungswasserstand erreicht.

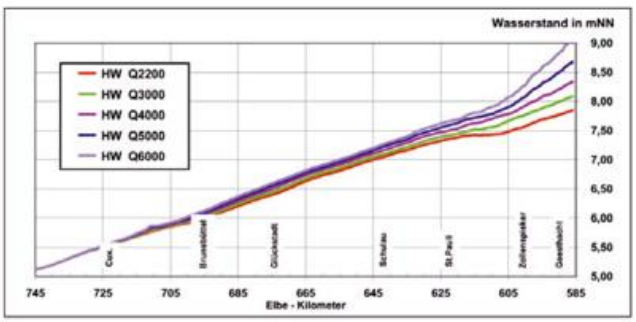


Abb. 6: Sturmflutscheitelwasserstand entlang der Tideelbe für die Bemessungssturmflut 2085A (Q2200) sowie für die Bemessungssturmflut in Kombination mit den extrem hohen Oberwasserszenarien Q3000, Q4000, Q5000 und Q6000.

Tab. 2: Charakteristische Wasserstände der Tideelbe für die Orte Cuxhaven, Hamburg St. Pauli und Zollenspieker (DEUTSCHES GEWÄSSERKUNDLICHES JAHRBUCH 1998).

	Cuxhaven	Hamburg St. Pauli	Zollenspieker
Mittleres Tidehochwasser MThw	NN + 1,50 m	NN + 2,10 m	NN + 2,40 m
Mittleres Tideniedrigwasser MTnw	NN – 1,45 m	NN – 1,50 m	NN – 0,20 m
Höchster Wasserstand HThw 03.01.1976	NN + 5,10 m	NN + 6,45 m	NN + 6,35 m
Höchster Wasserstand HThw 21.08.1990	NN + 3,01 m	NN + 4,17 m	NN + 4,35 m
HThw der Bemessungssturmflut 2085A	NN + 5,65 m	NN + 7,30 m	NN + 7,70 m
Höchster beobachteter Wasserstand HHThw	NN + 5,10 m	NN + 6,45 m	NN + 6,35 m

6 Zusammenfassung

Der Einsatz von HN-Modellen ermöglicht es, systematische Variationen des Oberwasserzuflusses sowohl bei mittleren Verhältnissen als auch bei Sturmfluten in tidebeeinflussten Flussmündungsgebieten durchzuführen und die Veränderungen im Wasserstand dem Einfluss des variierten Parameters (hier Oberwasserzufluss) zuzuordnen.

Die Ergebnisse der Systemstudie zeigen, dass HW und NW bei mittleren Tiden zwischen Geesthacht und Hamburg im Dezimeterbereich erhöht werden. Stromab von Hamburg wird die Elbe breiter und tiefer. Hier liegt der Einfluss des Oberwassers auf HW und NW lediglich im Zentimeterbereich.

Auch für die beiden untersuchten Sturmflutszenarien ergibt sich der größte Einfluss des Oberwassers auf die Sturmflutscheitelwasserstände stromauf von Hamburg (Tab. 3). Hier können extreme, bisher jedoch noch nie beobachtete Oberwasserereignisse auch bei relativ niedrigen Sturmfluten Wasserstände in der Größenordnung des Bemessungswasserstandes erreichen. In diesem Bereich müssen für den Hochwasserschutz sowohl Veränderungen im Sturmflutgeschehen der Nordsee als auch im Oberwasserabfluss, bedingt durch z. B. veränderten Niederschlag im Elbeeinzugsgebiet, beobachtet werden. Gegebenenfalls müssen diese Veränderungen bei der Definition der Bemessungssturmflut berücksichtigt werden. Stromab von Hamburg erhöht sich bei extremen Oberwasserereignissen der Wasserstand lediglich im Zentimeterbereich. Sobald die Tideelbe ihren engen Flusscharakter bei Brunsbüttel verliert, ist der Einfluss auf die Scheitelwasserstände vernachlässigbar klein.

Die Tideelbe läßt sich für die drei untersuchten Situationen hinsichtlich des Einflusses des Oberwassereinflusses auf die Scheitelwasserstände in drei Bereiche gliedern:

- Mündungsbereich stromab von Brunsbüttel: kein Einfluss des Oberwassers auf die Wasserstände
- Brunsbüttel bis Hamburg: Einfluss des Oberwassers auf die Wasserstände im Zentimeterbereich
- Hamburg bis Geesthacht: Einfluss des Oberwassers auf die Wasserstände im Dezimeterbereich

Die Kenntnis dieser unterschiedlich vom Oberwasserzufluss beeinflussten Bereiche der Unterelbe erleichtert es, den Küstenschutz an die spezifischen Probleme der Tideelbe anzupassen.

	Cuxhaven	St. Pauli	Bunthaus	Zollenspieker
Astronomische Tide	< 1 cm	10 cm	30 cm	55 cm
Sommerflut	< 1 cm	10 cm	17 cm	30 cm
Bemessungssturmflut	< 1 cm	10 cm	15 cm	20 cm

Tab. 3: Zunahme des Hochwasserstandes HThw pro 1000 m³/s Oberwasserzunahme für die Orte Cuxhaven (Elbe km 725), Hamburg St. Pauli (Elbe km 623N), Bunthaus (Elbe km 609) und Zollenspieker (Elbe km 600).

Literatur

ALBRITTON, D. L., L. G. MEIRA FILHO, 2001: Report of the Working Group I: The Scientific Basis, 149-219, in: IPCC (Hrsg.), 2001: Climate Change 2001: Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I, II and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press*, Cambridge UK, 398 S.

BAW, 1998: HN-Verfahren TRIM-2D – Validierungsdokument. Bericht der Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, 55 S, auch erhältlich unter http://www.baw.de/ bzw. http://www.baw.de/vip/abteilungen/wbk/Methoden/hnm/trim2d/trim2d1.pdf.

BAW, 2000: Untersuchung regionaler Windwirkungen, hydrodynamischer Systemzustände und Oberwassereinflüsse auf das Sturmflutgeschehen in Tideästuarien. Bericht der Bundesanstalt für Wasserbau - Dienststelle Hamburg, 65 S, auch erhältlich unter http://www.baw.de/ bzw. http://www.baw.de/vip/abteilungen/wbk/Projekte/nordsee/KFKI_BERICHT_BAW_00.pdf.

CASULLI, V., 1990: Semi implicit finite difference method for the two dimensional shallow water equations. *Journal of Computational Physics* **86**, 56-74.

DEUTSCHES GEWÄSSERKUNDLICHES JAHRBUCH, 1998: Elbegebiet Teil III – Untere Elbe ab der Havelmündung. *Freie und Hansestadt Hamburg, Strom- und Hafenbau*, 182 S.

GÖNNERT, G., W. SIEFERT, 1998: Sturmflutatlas Cuxhaven. *Freie und Hansestadt Hamburg, Strom- und Hafenbau*, Studie Nr. **91**, 314 S.

IKSE (Hrsg.), 2001: Bestandsaufnahme des vorhandenen Hochwasserschutzniveaus im Einzugsgebiet der Elbe. *Bericht der Internationalen Kommision zum Schutz der Elbe*, Magdeburg, 74 S.

IKSE (Hrsg), 2004: Dokumentation des Hochwassers vom August 2002 im Einzugsgebiet der Elbe. *Bericht der Internationalen Kommision zum Schutz der Elbe*, Magdeburg, 207 S, auch erhältlich unter http://elise.bafg.de/.

LÄNDERARBEITSGRUPPE, 1988: Bemessungswasserstände entlang der Elbe, Bericht der Länderarbeitsgruppe. *Die Küste* **47**, 31-50.

PANSCH, E., 1989: New Harmonic Tidal Constants for some German North Sea Stations. *Dt. Hydrogr. Z.* **42**, 27 - 39.

SCHMIDT, H., J. PÄTSCH, 1992: Meteorologische Messungen auf Norderney und Modellrechnungen. *Die Küste* **54**, 131-142.

SIEFERT, W., 1998: Bemessungswasserstände 2085A entlang der Elbe. Ergebnisse einer Überprüfung durch die Länderarbeitsgruppe nach 10 Jahren. *Die Küste* **60**, 228-255.

Anschrift der Autorin

Dr. Elisabeth Rudolph
Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg
Wedeler Landstraße 157
22559 Hamburg
E-Mail: elisabeth.rudolph@baw.de

promet, Jahrg. 31, Nr. 2–4, 191-196 (Oktober 2005)
© Deutscher Wetterdienst 2005

C. BECK, J. GRIESER, B. RUDOLF, U. SCHNEIDER

Globale Niederschlagsanalysen des Weltzentrums für Niederschlagsklimatologie für den Zeitraum ab 1951

Analysis Products of the Global Precipitation Climatology Centre for the Period Since 1951

Zusammenfassung
Niederschlag ist eine der Schlüsselvariablen des Klimasystems. Er hat einen direkten Einfluss auf die Lebensbedingungen der Menschen. Daher kommt dem Wissen um die raumzeitliche Niederschlagsverteilung sowie deren Änderung große Bedeutung zu. Das Weltzentrum für Niederschlagsklimatologie (WZN) erzeugt regelmäßig zeitnahe Weltkarten der monatlichen Niederschlagshöhe. Diese Daten sind von großer Bedeutung z. B. für Ernteverhersagen, die Kalibrierung von Satellitendaten oder die Verifizierung von Modellen. Für die Untersuchung der langzeitlichen Niederschlagsvariabilität sind sie jedoch nicht optimal geeignet, da sie auf zu wenigen und zu wechselhaften Beobachtungen basieren. Das Weltzentrum für Niederschlagsklimatologie stellt nun zwei weitere Produkte bereit, die speziell für die Klimaforschung geeignet sind. Eines davon, die Full-Data-Reanalyse 1951–2004, basiert auf allen verfügbaren Daten und liefert somit beste Niederschlagskarten für jeden Einzelmonat. Das zweite Produkt, die VASClimO Niederschlagsklimatologie 1951–2000, basiert auf langen Zeitreihen und vermeidet somit Inhomogenitäten aufgrund zeitlich variierender Stationsdichte und -verteilung.

Abstract
Precipitation is one of the climatological key variables affecting human life and property. Knowledge of the spatio-temporal variations of precipitation is important for many applications. Observed global precipitation data are used for verification and calibration of satellite data, evaluation of global circulation models as well as the investigation of the global hydrological cycle and its temporal variability. The Global Precipitation Climatology Centre (GPCC) is preparing near-realtime precipitation maps on a regular basis. Though these data are of great importance e.g. for crop forecast, calibration of satellite data or verification of models, they are too crude and their quality depends too much on time as to use them for climate variability studies. Therefore, the GPCC has released 2 global precipitation climatologies especially designed for climate research. One of these (the Full-Data Reanalysis 1951–2004) uses all data available for a certain time step and thus offers the best spatial data density for each month but time dependent accuracy. The other one (VASClimO Climatology 1951–2000) uses only stations for which data are available over a long period in order to produce a temporarily homogeneous data set.

1 Einführung

Dem Niederschlag kommt innerhalb des Klimasystems eine zentrale Bedeutung zu. Er ist ein wesentliches Element des globalen Energie- und Wasserkreislaufs und damit bedeutsamer Einfluss- und Steuerungsfaktor für alle natürlichen und gesellschaftlichen Kompartimente des Erdsystems. Aufgrund seiner ausgeprägten raumzeitlichen Variabilität erfordert seine flächendeckende quantitative Erfassung ein ungleich dichteres bodengestütztes Beobachtungsnetz als andere meteorologische Größen (z. B. Lufttemperatur), das durch verschiedene indirekte Abschätzungsverfahren (Satelliten- und Radar-Fernerkundung) ergänzt wird.

Das **W**eltzentrum für **N**iederschlagsklimatologie (WZN, **G**lobal **P**recipitation **C**limatology **C**entre, GPCC) erstellt seit mehr als 16 Jahren globale Niederschlagsanalysen, die eine unverzichtbare Grundlage für verschiedene internationale Programme und Großprojekte im Bereich der Klimaforschung und -überwachung sowie der Hydrologie darstellen. Der DWD hat diese Aufgabe als eine internationale Verpflichtung aufgrund einer Bitte der WMO übernommen. Die Entwicklungsarbeiten begannen im September 1988 mit einer umfassenden Förderung seitens des BMBF (früher BMFT). Bereits 1989 wurden erfolgreich erste Analysen durchgeführt. War zunächst die Erstellung eines zehnjährigen Datensatzes (1986–1995) für GEWEX (**G**lobal **E**nergy and **W**ater Cycle **Ex**periment des Weltklimaforschungsprogramms) das primäre Ziel, wurde bereits 1990, angesichts zunehmend gesicherter Indizien für einen globalen Klimawandel, die langfristige Weiterführung der Projekte des Weltklimaforschungsprogramms initiiert und mit GCOS (**G**lobal **C**limate **O**bserving **S**ystem) und GTOS (**G**lobal **T**errestrial **O**bserving **S**ystem) neue permanente Instrumente zur globalen Klimaüberwachung geschaffen.

Über die Entwicklung des WZN wurde bereits mehrfach in Promet berichtet (RUDOLF 1990, 1994), wesentliche wissenschaftliche Grundlagen und Methoden wurden in der Meteorologischen Zeitschrift vorgestellt (RUDOLF et al. 1992). Die Grundlagen zur Analyse langer Zeitreihen im WZN wurden im Forschungsprojekt VASClimO (**V**ariability **A**nalysis of **S**urface **Cli**mate **O**bservations) vom DWD gemeinsam mit der Goethe-Universität Frankfurt entwickelt, was durch eine Förderung im Rahmen des Deutschen Klimaforschungsprogramms DEKLIM ermöglicht wurde.

Das WZN des DWD arbeitet international im Auftrag und mit politischer Unterstützung der WMO. Diese administrativen Rahmenbedingungen ermöglichen erst die Akquisition einer umfangreichen Datengrundlage, wie sie für zuverlässige quantitative globale Niederschlagsanalysen erforderlich ist. Diese Datengrundlage ist inzwischen zur weltweit umfangreichsten Niederschlagsdatenbasis herangewachsen. Aufgrund der dringenden Empfehlungen der WMO erhält das WZN kostenlos weltweite Daten aus den dichten nationalen hydrometeorologischen Messnetzen. Gemäß internationaler Vereinbarungen ist es nicht autorisiert, diese Daten weiter zu geben; die verschiedenen daraus abgeleiteten Analyseprodukte (Rasterdaten) stehen dagegen frei zur Verfügung.

Die allen Produkten des WZN zugrundeliegende Datenbasis enthält monatliche, auf konventioneller Messung beruhende Niederschlagshöhen. Wenn auch die Urheber der meisten Daten letztlich die nationalen Wetterdienste sind, so haben diese doch unterschiedliche Wege zum WZN genommen. Im WZN werden sie deshalb unterschiedlichen Datenquellen zugeordnet (vgl. Tab. 1) und dementsprechend in der WZN-Datenbank archiviert.

Der derzeitige Datenbestand (Januar 2005) ist als Anzahl der Daten je Monat und Datenquelle in Abb. 1 dargestellt. Im zeitlichen Verlauf der Datenbelegung fällt zunächst der sprunghafte Anstieg zum Beginn des Jahres 1986 auf. Dieser resultiert aus der ursprünglichen Definition der GEWEX-Analyseperiode 1986-1995. Mit dem Bedarf der Klimaforschung und -überwachung wurde nicht nur der fortlaufende Betrieb des WZN begründet, sondern auch der Analysezeitraum rückwirkend erweitert. Im Rahmen eines DEKLIM-Projektes wurden zunächst die Sammlungen historischer Beobachtungsdaten von CRU, FAO und GHCN übernommen. Weil die wahre Herkunft dieser Daten jedoch teilweise unklar ist und insbesondere ihre zeitlich-räumliche Verteilung sehr heterogen ist, hat die WMO im Jahr 2004 erneut alle Mitglieder aufgefordert, dem WZN kostenfrei vollständige Datenkollektive zu liefern. Damit wird die Datenbasis des WZN fortlaufend so zeitnah wie möglich aktualisiert und darüber hinaus im notwendigen Umfang räumlich verdichtet und rückwirkend ergänzt. Der allmähliche Rückgang der Datenbelegung von 1986 an bis heute geht weniger auf das Schrumpfen vieler nationaler Messnetze zurück, als vielmehr auf die sehr unterschiedlichen Zeitspannen, welche die einzelnen Länder zur Sammlung, Aufbereitung und Bereitstellung der nationalen Daten benötigen.

DWD Synop	im WZN aus den über GTS in Offenbach (DWD) empfangenen synoptischen Meldungen abgeleitete monatliche Daten
CPC Synop	im CPC/NOAA aus den über GTS in Washington (NOAA) empfangenen synoptischen Meldungen abgeleitete monatliche Daten
CLIMAT	monatliche CLIMAT-Bulletins, die über GTS in Offenbach (DWD) empfangen wurden,
Regional	Datensammlungen regionaler Projekte (bspw. im Rahmen von GEWEX)
National	von nationalen Wetterdiensten aus (bisher) 176 Ländern dem WZN gelieferte Daten
CRU	globale Datensammlung der Climate Research Unit (CRU, Norwich)
FAO	globale Datensammlung der UN Food and Agriculture Organisation (FAO, Rome)
GHCN	globale Datensammlung des Global Historical Climatology Network (GHCN, NCDC Asheville)

Tab. 1: Zuordnung der Niederschlagsdaten des WZN zu den Datenquellen.

Die verschiedenen Analyseprodukte unterscheiden sich durch die Auswahl der jeweils verwendeten Daten aus dem Gesamtpool unter Berücksichtigung der verschiedenen Prioritäten seitens der Anwender, hinsichtlich ihrer zeitlichen Verfügbarkeit, ihrer quantitativen Genauigkeit und ihrer Homogenität. Weitere Unterschiede ergeben sich aus dem Grad der Qualitätskontrolle sowie der jeweils verwendeten Analysemethode. Abb. 2 zeigt die Anzahl der für die drei nachfolgend erläuterten Produkte des WZN verfügbaren bzw. optimal ausgewählten Stationen. Erfreulich ist

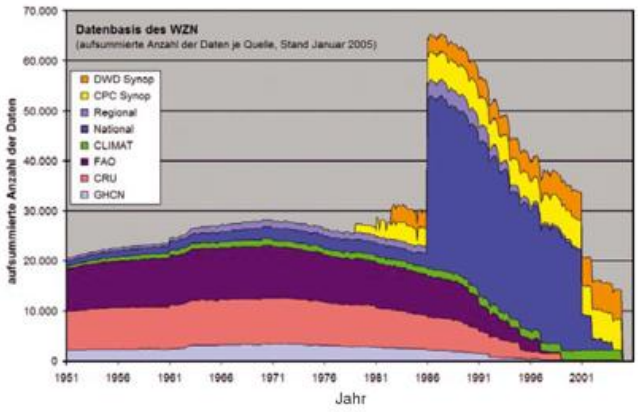


Abb. 1: Aufsummierte Anzahl der Niederschlagsdaten seit 1951, differenziert nach den Datenquellen (Stand: Januar 2005, Erläuterung der Quellen siehe Tab. 1).

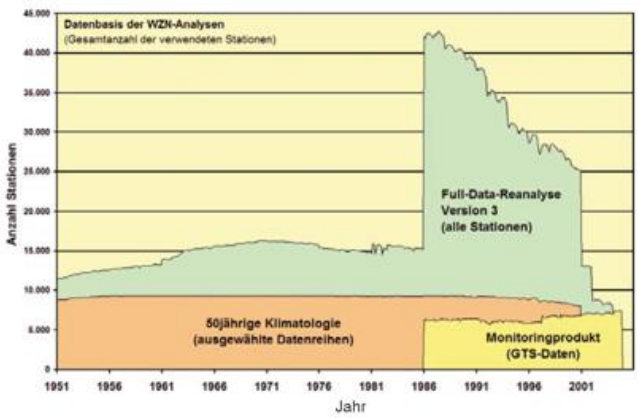


Abb. 2: Datenbasis für das zeitnahe Monitoringprodukt, die Full-Data-Reanalyse 1951–2004 (Version 3) sowie für die VASClimO-Niederschlagsklimatologie 1951–2000.

der Anstieg der für das Monitoringprodukt verwendeten quasi-Echtzeitdaten.

2 Quasi-operationelle Analysen des WZN

Regelmäßig monatlich liefert das WZN relativ bald nach Beobachtung zwei Analysen der Niederschlagsverteilung über den globalen Landflächen. Eine erste qualitative Schätzung der Niederschlagsanomalie („First Guess"), welche nur auf der Grundlage der in Offenbach über GTS empfangenen synoptischen Daten und einer anschließend rein automatischen Datenprüfung erstellt wird. Diese wird wenige Tage nach Monatsende im Internet als Karte publiziert (http://gpcc.dwd.de). Innerhalb von zwei Monaten folgt dann eine hinsichtlich Datenumfang und Qualität deutlich verbesserte Analyse der monatlichen Niederschlagshöhe. Diese beruht zusätzlich auf den dann verfügbaren SYNOP-Derivaten des CPC sowie auf den qualitativ hochwertigen monatlichen CLIMAT-Bulletins. Die Daten der drei Quellen werden miteinander verglichen und automatisch vorgeprüft. Eine abschließende visuelle Expertenprüfung der automatisch als fragwürdig eingestuften Daten sichert eine hohe Qualität der zur Analyse verwendeten Werte. Das resultierende sog. „Monitoring Product" wird von verschiedenen Instituten als in-situ Datenbasis zur Kalibrierung von aus Satellitenbeobachtungen abgeleiteten Niederschlagsfeldern verwendet (HUFFMAN et al. 1995, XIE und ARKIN 1997, HUFFMAN et al. 2001, ADLER et al. 2003).

3 Neue Analyseprodukte für den Zeitraum ab 1951

Die fortlaufende zeitnahe Erzeugung monatlicher Rasterdaten liefert einen wichtigen Beitrag zur kontinuierlichen Klimaüberwachung. Wegen der geringen Datendichte, beträchtlicher Qualitätsmängel der verwendeten Echtzeitdaten, sowie häufiger Änderungen der Anzahl und Verteilung der Stationen (in Folge von Neueröffnungen, Schließungen bzw. Verlegungen von Stationen bzw. der Übermittlung der Datenkollektive nur für Teilzeiträume usw.) unterliegt die Qualität dieser Rasterdaten jedoch großen zeitlichen Schwankungen. Sie sind weder für Klimavariabilitätsstudien erstellt noch geeignet. Mit Förderung des BMBF im Rahmen des Deutschen Klimaforschungsprogramms DEKLIM konnten im WZN zwei neue Analyseprodukte entwickelt werden, die den Zeitraum ab 1951 mit monatlichen gerasterten Niederschlagsdaten abdecken.

Full-Data-Reanalyse 1951–2004

Der sogenannten Full-Data-Reanalyse liegt die Zielsetzung zugrunde, monatliche Niederschlagsanalysen auf der Grundlage jeweils maximaler Stationsdichte und bestmöglicher Datenqualität zu erstellen. Dementsprechend werden alle verfügbaren Daten verwendet, wobei für jeden Einzelmonat und jede Station, bei gleichzeitiger Verfügbarkeit verschiedener Datenquellen jeweils der vertrauenswürdigste Messwert in die Analyse einfließt. Auf diese Weise wird für jeden Einzelmonat der Analyse die dichteste und qualitativ beste Datenbasis zugrundegelegt. Allerdings führt dieses Vorgehen zu zeitlichen Inkonsistenzen hinsichtlich Anzahl und Verteilung der verwendeten Stationen. So werden für den am besten belegten Monat Juli 1987 Daten von etwa 43.000 Stationen verwendet, während im Zeitraum vor 1986 maximal etwa 15.000 Stationen verfügbar sind. Für die jüngste Zeit (2003/2004) unterscheidet sich die Reanalyse kaum noch von dem auf quasi-Echtzeitdaten beruhenden Monitoringprodukt. Für die Zeitreihen der Rasterwerte der Full-Data-Reanalyse ergeben sich hieraus mitunter erhebliche Inhomogenitäten. Aufgrund der höchstmöglichen Genauigkeit der gerasterten Gebietsniederschläge im Einzelmonat ist diese Analyse besonders zur Validierung oder Verifizierung von Modellergebnissen und indirekten Beobachtungen geeignet. Der relative Samplingfehler der im Raster berechneten monatlichen Gebietsniederschläge liegt unter 10 %, wenn durchschnittlich mehr als 8 Stationen verfügbar sind. Bei nur 4 Stationen kann der Fehler durchaus 30 % deutlich überschreiten. Der Samplingfehler hängt zudem von der regionalen Niederschlagsvariabilität ab (RUDOLF et al. 1994). Als eine Grundlage zur Bewertung der Full-Data-Reanalyse wie auch des Monitoringprodukts werden dem Nutzer zusätzlich fehlerbezogene Rasterdaten wie die jeweilige Stationsverteilung sowie geschätzte Werte für den systematischen Messfehler im Internet bereitgestellt.

VASClimO-Niederschlagsklimatologie 1951 - 2000

Im Unterschied zur oben vorgestellten Full-Data-Reanalyse beruht die 50-jährige VASClimO-Niederschlagsklimatologie auf einer weitestgehend zeitlich konsistenten und homogenen Datenbasis. Sie eignet sich daher insbesondere für Studien zur langzeitlichen Niederschlagsvariabilität. Aus dem gesamten beim WZN verfügbaren Datenbestand wurden nur solche Stationen verwendet, die im Zeitraum 1951–2000 eine Datenbelegung von mindestens 90 % aufweisen. Zeitreihen dieser Stationen wurden aus den Messwerten der verschiedenen verfügbaren Datenquellen kompiliert. Durch eine aus dem Vergleich zeit- und ortsgleich verfügbarer Daten verschiedener Datenquellen abgeleitete Strategie wurde dabei sichergestellt, dass nach Möglichkeit nur Datenquellen mit hoher Übereinstimmung der Messwerte innerhalb der einzelnen Stationsreihen kombiniert wurden. Des weiteren erfolgte für alle Stationsreihen die Detektion und wenn nötig die Eliminierung zeitlicher und räumlicher Ausreißer sowie bei Verfügbarkeit geeigneter Referenzreihen die Überprüfung der Zeitreihenhomogenität und die Homogenisierung statistisch signifikanter Inhomogenitäten. Die räumliche Stationsverteilung der in die Analyse eingehenden 9.343 Stationen sowie die Ergebnisse

der Homogenitätsprüfung illustriert Abb. 3. Anschließend erfolgte die Interpolation der Beobachtungsdaten auf ein 0,5° x 0,5°-Gitter mittels Kriging-Interpolation der relativen Abweichungen vom an den Stationen beobachteten Langzeitmittel. Da solche Langzeitmittel des Niederschlages für weitaus mehr Stationen zur Verfügung stehen, konnte der mittlere Niederschlag an den Gitterpunkten auf der Basis von über 28.000 Stationen berechnet werden. Dadurch gelingt es, deutlich kleinräumigere Strukturen zu erfassen, als es bei ausschließlicher Nutzung der Stationen, für die lange quasi-lückenlose Zeitreihen verfügbar sind, der Fall gewesen wäre. Die Abschätzung des Flächenmittels des Niederschlags für jedes 0,5° x 0,5°-Raster geschieht durch Mittelung der interpolierten Werte an den jeweils vier Eckpunkten. Die Interpolation wurde ausschließlich für Gitterpunkte über Land durchgeführt. Entsprechend der zugrunde liegenden regional sehr unterschiedlichen Stationsdichte sind die Interpolationsresultate räumlich differenziert zu bewerten; aufgrund zu geringer Stationsdichte wurde auf eine Interpolation der Gitterpunkte über Grönland und der Antarktis verzichtet.

Neben den gerasterten monatlichen Niederschlagshöhen für den Zeitraum 1951–2000 wird für jeden Einzelmonat auch eine Abschätzung des regionalen Interpolationsfehlers bereitgestellt. Mittels eines als Jackknifing bezeichneten Verfahrens wurde jedem Beobachtungswert derjenige Wert zur Seite gestellt, den man durch Interpolation an diesen Ort zu diesem Zeitpunkt unter Ausschluss der dort vorliegenden Beobachtung bestimmt hätte. Der Jackknife-Fehler kann also sowohl dazu verwendet werden, die Bedeutung einer einzelnen Station in Bezug auf die sie umgebenden Stationen zu messen, als auch dazu, die regionale Stationsdichte zu bewerten. In Regionen mit relativ kleinem Jackknife-Fehler kann die Stationsdichte als ausreichend angesehen werden. Ein auf den einzelnen Gitterpunkt jedoch nicht auf den einzelnen Monat bezogenes, statistisches Fehlermaß ist der am Gitterpunkt erklärte Varianzanteil. Dieser kann approximiert werden, indem für jede beobachtete Niederschlagsreihe die Korrelation mit den Beobachtungsreihen benachbarter Stationen modelliert wird. Als Beispiel zeigt Abb. 4 für jeden Gitterpunkt den erklärten Varianzanteil durch die nächstgelegene Station bezüglich der Januarniederschläge. Regionen, in denen die Stationsdichte verbesserungswürdig erscheint, werden hierdurch deutlich sichtbar. Dies sind insbesondere die räumlich stark gegliederte Region Indonesiens, sowie die datenarmen Regionen des Kongo, Angolas und der Arabischen Halbinsel.

Auf der Basis der VASClimO-Niederschlagsklimatologie werden sowohl Jahresgänge grundlegender statistischer Eigenschaften (Mittelwert, Standardabweichung, Variationskoeffizient) als auch ausgewählter Kenngrößen langzeitlicher Niederschlagsvariabilität (absolute und relative lineare Trends, Trend/Rausch-Verhältnis und Trendsignifikanz) über den 50-jährigen Analysezeitraum ermittelt und verfügbar gemacht.

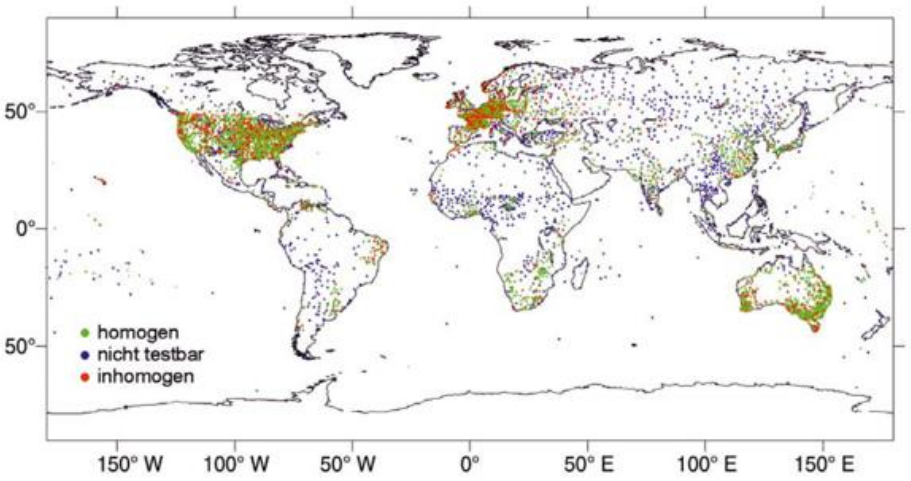


Abb. 3: Räumliche Verteilung und Ergebnisse der Homogenitätsprüfung von 9.343 der 50-jährigen VASClimO Niederschlagsklimatologie zugrundeliegenden Niederschlagszeitreihen.

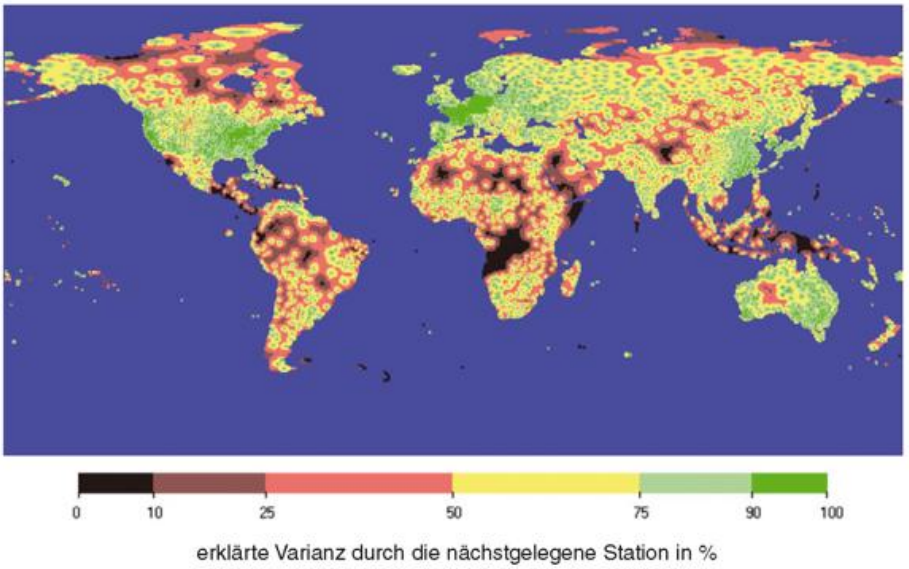


Abb. 4: Durch die nächstgelegene Station erklärter Varianzanteil der Januarniederschläge an jedem Gitterpunkt.

Da die Schätzung linearer Trends durch die Schiefe der Niederschlagsverteilung und insbesondere durch seltene sehr intensive Niederschlagsereignisse stark verfälscht werden kann, wird hier ausschließlich die räumliche Verteilung der Signifikanz lokaler Trends (bestimmt durch den Mann-Kendall Test, d. h. parameterfrei und somit ohne die Beschränkung auf lineare Trends) vorgestellt. Abb. 5 zeigt deutlich, dass für große Teile der Erdoberfläche keine signifikanten Trends in der Jahressumme des Niederschlags für den Zeitraum von 1951 bis 2000 gefunden werden. Jedoch sind auch klare und großräumig signifikante Trends zu erkennen wie z. B. ausgeprägte Niederschlagsabnahmen im Sahel sowie ein negativer Trend im Mittelmeergebiet.

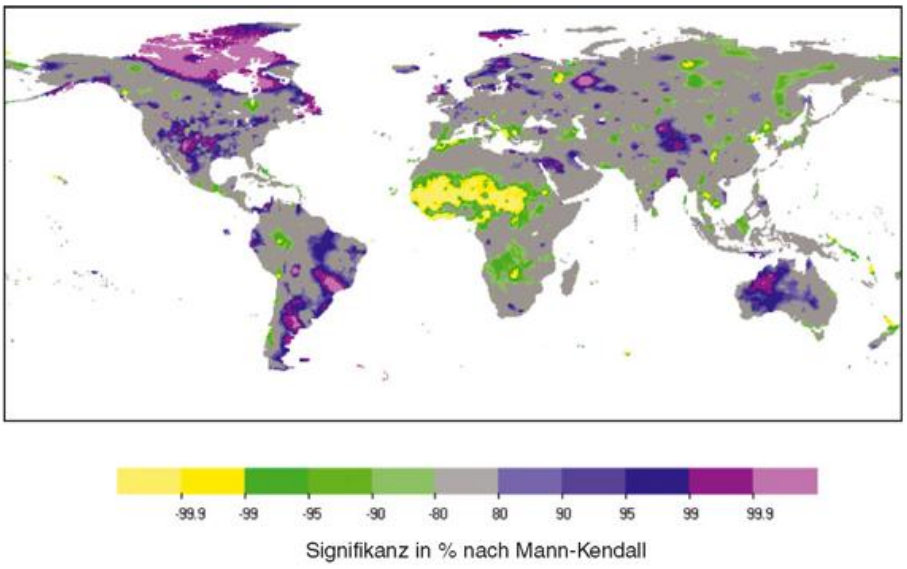


Abb. 5: Globale Verteilung der Signifikanz von Trends jährlicher Niederschlagshöhen im Zeitraum von 1951 bis 2000 auf Basis des Mann-Kendall Tests. Rasterauflösung: 0,5° x 0,5° in geografischer Länge und Breite.

Die detektierten Trends der jährlichen Niederschlagshöhen beruhen nicht immer auf intra-annuell übereinstimmenden Entwicklungen sondern resultieren häufig aus unterschiedlichen Trends zu verschiedenen Jahreszeiten mit zum Teil unterschiedlichen Vorzeichen.

Eine wichtige und sozioökonomisch sehr bedeutende Frage der aktuellen Klimaforschung betrifft den globalen Wasserkreislauf. Aufgrund konzeptioneller Erwägungen lässt eine globale Erwärmung eine verstärkte Verdunstung und als Konsequenz über die globale Landfläche gemittelt verstärkte Niederschläge vermuten. Ein Blick auf die in Abb. 6 dargestellte Zeitreihe der jährlichen Niederschläge zeigt jedoch, dass im Zeitraum von 1951 bis 2000 keine systematische Zunahme des global über die Landflächen gemittelten Niederschlags zu erkennen ist.

Die Erstellung der neuen 50-jährigen Niederschlagsklimatologie des WZN im Rahmen des VASClimO-Forschungsprojekts ist ausführlicher in BECK et al. (2005) dargestellt.

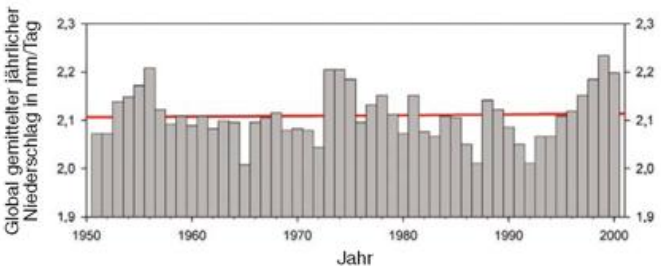


Abb. 6: Global gemittelter jährlicher Niederschlag der Landoberflächen in mm/Tag von 1951 bis 2000 und lineare Trendgerade (rote Linie).

4 Schlussbemerkung

Das WZN stellt globale Niederschlagsanalysen zur Verfügung, die unter Verwendung ausgesuchter Datenkollektive und Analysemethoden für unterschiedliche wissenschaftliche Zielsetzungen optimiert erstellt werden. Während die zeitnah verfügbaren First-Guess- und Monitoring-Analysen in erster Linie der aktuellen klimatischen Einschätzung dienen, beispielsweise zur Überwachung von Dürren und außergewöhnlich hohen monatlichen Niederschlägen, stellen die neuen Analyseprodukte des GPCC für den Zeitraum ab 1951 eine wesentliche Ergänzung zu den modellgestützten Reanalysen des EZMW (ERA-40) und des NCAR dar. Im Vergleich zu anderen global gerasterten historischen Niederschlagsdatensätzen basieren die WZN-Produkte auf einer besonders umfassenden Datenbasis und sind hinsichtlich der Datenauswahl optimiert. Während die Gebietsniederschläge der Full-Data-Reanalyse im Einzelraster eine hinsichtlich der Datenbasis größtmögliche Genauigkeit aufweisen, liefert die im Rahmen des DEKLIM-Projekts VASClimO entstandene 50-Jahresklimatologie eine neue und einzigartige Grundlage für vielfältige Variabilitätsstudien, welche in den nächsten Report des IPCC einfließen sollen.

Alle genannten Produkte des WZN sind über die Homepage des WZN (http://gpcc.dwd.de) frei verfügbar. Monatlich verzeichnet das WZN im Durchschnitt etwa 7.000 Zugriffe auf seine Internetseiten und etwa 2.000 Downloads der Rasterdaten. Den Nutzern wird hier dringend empfohlen, nicht das erste, sondern das für den spezifischen Verwendungszweck optimierte Produkt zu verwenden, und in jedem Fall auch die mit den Niederschlagsanalysen im Raster bereitgestellten Fehlerinformationen (regionale Dichte der Datenbasis,

systematische Messfehler) zu beachten. Im besonderen sollte die höchste räumliche Auflösung von 0,5° nicht im Einzelraster sondern als Gesamtbild betrachtet werden; sie dient in erster Linie der Berechnung von Gebietsniederschlägen für unregelmäßige Flächen, bspw. für Flusseinzugsgebiete oder Klimazonen (RUDOLF und SCHNEIDER 2005).

Obwohl das WZN bereits jetzt über die weltweit umfangreichste Sammlung beobachteter Niederschlagsdaten verfügt stellt die sinnvolle Erweiterung der Datenbasis sowohl in räumlicher als auch in zeitlicher Perspektive eine wesentliche Herausforderung für die Zukunft dar. Damit einher gehen zum einen Aktualisierungen der hier vorgestellten als auch die Erstellung weiterer Analyseprodukte. Die Bedeutung und internationale Anerkennung des WZN und der von ihm durchgeführten Analysen wird unter anderem aus dem 10-Year Implementation Plan for GEOSS (GEO 2005) deutlich, der neben dem EZMW und dem GRDC das WZN als wichtiges in Europa betriebenes globales Zentrum benennt.

*Das Forschungsprojekt VASClimO (**V**ariability **A**nalysis of **S**urface **Cli**mate **O**bservations) wird vom DWD gemeinsam mit der Goethe-Universität Frankfurt am Main durchgeführt und vom Bundesministerium für Erziehung und Wissenschaft im Rahmen des Deutschen Klimaforschungsprogramms DEKLIM unter dem Kennzeichen 01LD0032 gefördert.*

Literatur

ADLER, R. F., G. J. HUFFMAN, A. CHANG, R. FERRARO, P.-P. XIE, J. JANOWIAK, B. RUDOLF, U. SCHNEIDER, S. CURTIS, D. BOLVIN, A. GRUBER, J. SUSSKIND, P. ARKIN, E. NELKIN, 2003: The Version-2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Precipitation analysis (1979–present). *J. Hydrometeorol.* **4,** 1147-1167.

BECK, C., J. GRIESER, B. RUDOLF, 2005: A New Monthly Precipitation Climatology for the Global Land Areas for the Period 1951 to 2000. DWD, *Klimastatusbericht 2004*, 181-190.

GEO 2005: Global Earth Observation System of Systems GEOSS 10-Year Implementation Plan: Reference Document. Bruce Battrick (Hrsg.), ESA ESTEC, GEO 204/ESA SP-1284, ISSN No.: 0379-6566, ISBN No.: 92-90092-986-3, Noordwijk, February 2005, 185 S.

HUFFMAN, G. J., R. F. ADLER, B. RUDOLF, U. SCHNEIDER, P. R. KEEHN, 1995: Global precipitation estimates based on a technique for combining satellite-based estimates, rain gauge analysis, and NWP model precipitation information. *J. Climate* **8**, 1285-1295.

HUFFMAN, G. J., R. F. ADLER, M. M. MORRISSEY, D. T. BOLVIN, S. CURTIS, R. ROYCE, B. MCGAVOCK, J. SUSSKIND, 2001: Global precipitation at one-degree daily resolution from multi-satellite observations. *J. Hydrometeorol.* **2**, 36-50.

RUDOLF, B., 1990: Das Weltzentrum für Niederschlagsklimatologie: Aufgaben, Grundlagen und erste Ergebnisse. *promet* Heft **1/2** '90, 66-69.

RUDOLF, B., H. HAUSCHILD, M. REIß, U. SCHNEIDER, 1992: Beiträge zum Weltzentrum für Niederschlagsklimatologie – Contributions to the Global Precipitation Climatology Centre. *Meteorol. Z. N. F.* 1 Nr. **1**, 7-84.

RUDOLF, B., 1994: Globale Niederschlagsanalysen des Weltzentrums für Niederschlagsklimatologie. *promet* **4** '93 (erschienen 1994), 124-128.

RUDOLF, B., U. SCHNEIDER, 2005: Calculation of gridded precipitation data for the global land-surface using in-situ gauge observations. Proceedings of the 2nd Workshop of the International Precipitation Working Group IPWG, Monterey October 2004. *EUMETSAT Report* im Druck.

XIE, P., P.A. ARKIN, 1997: Global Precipitation: a 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* **78**, 2539-2558.

Anschrift der Autoren:

Dr. Christoph Beck
E-Mail: christoph.beck@dwd.de
Dr. Jürgen Grieser
E-Mail: juergen.grieser@dwd.de
Dr. Bruno Rudolf
E-Mail: bruno.rudolf@dwd.de
Dipl-Met. Udo Schneider
E-Mail: udo.schneider@dwd.de
Alle:
Deutscher Wetterdienst
Weltzentrum für Niederschlagsklimatologie
Postfach 10 04 65
63004 Offenbach/Main

promet, Jahrg. 31, Nr. 2–4, 197-200 (Oktober 2005)
© Deutscher Wetterdienst 2005

P. LEMKE

25 Jahre Weltklimaforschungsprogramm

25 Years World Climate Research Programme

Zusammenfassung
Klimaänderungen machen an Ländergrenzen nicht halt. Daher ist die Klimaforschung ein länderübergreifendes Anliegen. Wegen der zunehmenden Aktualität dieses Themas wurden in den vergangenen zwei Dekaden verschiedene internationale Programme eingerichtet. Diese Aktivitäten umfassen im Wesentlichen überwiegend naturwissenschaftlich ausgerichtete Programme zur Erforschung des Globalen Wandels. Hierzu zählt in erster Linie das **W**orld **C**limate **R**esearch **P**rogramme (WCRP), in dessen Rahmen seit Beginn der 1980er Jahre das globale Klimasystem mit mathematisch-physikalischen Methoden erforscht und die Prognose globaler und regionaler Klimaänderungen ermöglicht werden soll.

Abstract
Climate variations ignore country borders. They are large-scale and often global features of the evolution of the Earth System. Climate research is, therefore, an international concern. Because of the growing evidence of global warming, several international programmes have been initiated in the past two decades. Of special importance is the **W**orld **C**limate **R**esearch **P**rogramme (WCRP), which, since its inception in 1980, co-ordinates the investigation of the global climate system using mathematical-physical methods, providing a basis for the improved prediction of global and regional climate variations.

Das WCRP, ein Teilprojekt des World Climate Programme, wurde 1980 gemeinsam von ICSU (International Council of Science) und WMO (**W**orld **M**eteorological **O**rganisation) gegründet. Seit 1993 wird das WCRP auch von der **I**ntergovernmental **O**ceanographic **C**ommission (IOC) der UNESCO unterstützt. Ziel des WCRP ist es festzustellen, in welchem Umfang natürliche Klimaschwankungen sowie der anthropogene Einfluss auf das Klima verstanden und vorhergesagt werden können. Dazu ist ein quantitatives Verständnis der vier Hauptkomponenten des physikalischen Klimasystems (Atmosphäre, Ozean, Kryosphäre (Eismassen) und Landoberflächen) und ihrer gegenseitigen Wechselwirkung notwendig (Abb.1).

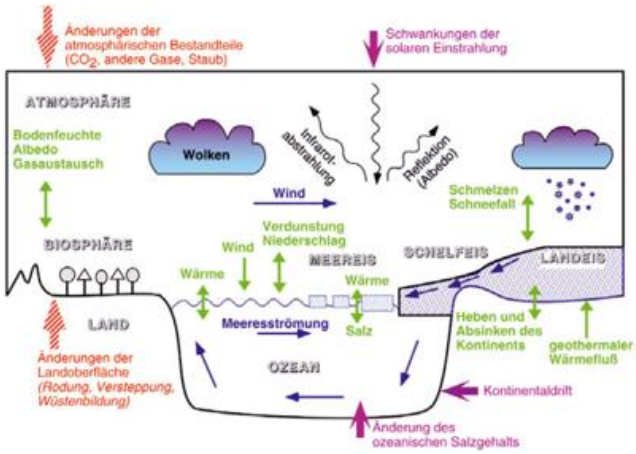


Abb. 1: Schematische Darstellung des Klimasystems. Die dünnen schwarzen bzw. blauen Pfeile stellen Strahlungs- bzw. Bewegungsvorgänge dar. Die grünen Pfeile deuten Wechselwirkungen im Klimasystem an, und die fetten Pfeile stellen Veränderungen der äußeren Randbedingungen dar, dabei sind die Auswirkungen menschlicher Aktivitäten auf das Klimasystem schraffiert gezeigt.

Um dieses Ziel zu erreichen, hat das WCRP verschiedene Projekte eingerichtet, in denen ausgewählte Bereiche des Klimasystems mit Hilfe von Beobachtungen, Datenanalyse und numerischer Modellierung untersucht werden. Die folgenden Projekte des WCRP sind zurzeit aktiv (siehe http://www.wmo.ch/web/wcrp/wcrp-home.html).

Climate and Cryosphere (CliC)
Das Projekt CliC untersucht seit 2000 die globale Kryosphäre, d.h. alle Formen von Eis im Klimasystem (außer dem Eis in den Wolken), also Meereis, Schelfeis, Landeis, Gletscher, Eiskappen, Permafrost und Schnee und deren Wechselwirkung mit dem Rest des Klimasystems, insbesondere mit Atmosphäre und Ozean. Die wesentlichen Forschungsthemen sind:

1. Untersuchung der Einwirkungen vergangener und zukünftiger Klimaänderungen auf die Eismassen dieser Welt,
2. Untersuchung der Prozesse, durch die die Kryosphäre mit dem Rest des Klimasystems wechselwirkt,
3. Verbesserung der Darstellung der Kryosphäre in Klimamodellen,
4. Verbesserung der Beobachtungssysteme für die Kryosphäre.

CliC ist ein Nachfolgeprojekt von ACSYS. Weitere Informationen wie z.B. den Forschungs- und Implementierungsplan findet man unter http://clic.npolar.no.

Climate Variability and Predictability (CLIVAR)
CLIVAR beschäftigt sich seit 1995 mit den Grundlagen der natürlichen Klimavariabilität, untersucht anthropogene Einwirkungen und hat zum Ziel, das Klima auf Zeitskalen von Jahreszeiten bis zu Jahrhunderten vorherzusagen. CLIVAR besteht aus drei Komponenten:

1. der Untersuchung von Variabilität und Vorhersagbarkeit des globalen gekoppelten Klimasystems (Ozean-Atmosphäre-Land) auf Zeitskalen von Jahreszeiten bis zu mehreren Jahren (GOALS),
2. der Untersuchung von Variabilität und Vorhersagbarkeit des globalen gekoppelten Klimasystems auf Zeitskalen von Dekaden bis Jahrhunderten (DecCen), mit besonderer Berücksichtigung des Ozeans im Klimasystem,
3. und der Modellierung und Zuordnung anthropogener Klimaänderungen (ACC).

Zu allen drei Komponenten gehört als Grundlage eine Verbesserung der Beobachtungssysteme und der verschiedenen Komponenten der Klimamodelle. Mit diesen Themen ist CLIVAR ein Nachfolgeprojekt von TOGA und WOCE (weitere Informationen unter http://www.clivar.org).

Global Energy and Water Cycle Experiment (GEWEX)

GEWEX untersucht seit 1988 den globalen Wasser- und Energiekreislauf. Ziel ist es, den Transport und den Austausch von Strahlung, Wärme und Wasser in der Atmosphäre und an der Erdoberfläche zu bestimmen, zu modellieren und vorherzusagen sowie die Auswirkungen einer Klimaänderung auf globale und regionale Niederschlagsregime abzuschätzen. Die wesentlichen Themen unter GEWEX sind:

1. die Untersuchung des Wasser- und Energiekreislaufs mithilfe von globalen Messungen atmosphärischer Parameter und der Erdoberflächeneigenschaften,
2. Modellierung des Wasserkreislaufs und seines Einflusses auf Atmosphäre, Ozean und Landoberflächen,
3. Entwicklung von Beobachtungssystemen, Assimilationstechniken und Modellen zur verbesserten Vorhersage von hydrologischen Parametern für Wetter und Klima.

GEWEX ist nun in die zweite Phase der Projektaktivitäten eingetreten, in der es unter anderem darum geht, ob sich der globale Wasserkreislauf durch die globale Erwärmung verstärkt hat oder nicht (weitere Informationen unter http://www.gewex.org).

Stratospheric Processes and their Role in Climate (SPARC)

SPARC befasst sich seit 1992 mit Beobachtung und Modellierung von Klimaänderungen in der Stratosphäre, insbesondere aber mit der Frage, welche Prozesse in der Stratosphäre auf das globale Klima einwirken. Die SPARC-Forschungsthemen sind:

1. der Einfluss der Stratosphäre auf das Klima,
2. die physikalischen und chemischen Vorgänge bei der stratosphärischen Ozonabnahme und die damit verbundenen Änderungen in der UV-Strahlung,
3. Langzeitbeobachtungen und Modellierung stratosphärischer Variationen

Einen neuen Schwerpunkt bildet der Einfluss chemischer Prozesse in der gesamten Atmosphäre auf die Entwicklung des Klimasystems (weitere Informationen unter http://www.atmosp.physics.utoronto.ca/SPARC).

Klimamodellierung

Die Entwicklung von globalen Klimamodellen ist im WCRP eine projektübergreifende Aufgabe, die sich zwei Arbeitsgruppen teilen. Die **W**orking **G**roup on **N**umerical **E**xperimentation (WGNE) befasst sich mit der Verbesserung der atmosphärischen Zirkulationsmodelle und stellt die Verbindung zu den operationellen Wettervorhersagezentren dar. Sie behandelt aber nicht nur die kurzen Wetterzeitskalen, sondern sorgt auch für die Verbesserung der Atmosphärenmodelle für die Untersuchung von Klimaschwankungen. Unter anderem hat sie das sehr erfolgreiche Projekt zum Vergleich der verschiedenen Atmosphärenmodelle eingerichtet (**A**tmospheric **M**odel **I**ntercomparison **P**roject, AMIP, http://www-pcmdi.llnl.gov/projects/amip).

Die **W**orking **G**roup on **C**oupled **M**odelling (WGCM) befasst sich mit der Entwicklung und Optimierung von globalen gekoppelten Klimamodellen. Neben vielen anderen Aktivitäten hat WGCM ein Projekt zum Vergleich der vielen gekoppelten Klimamodelle eingerichtet (**C**oupled **M**odel **I**ntercomparison **P**roject, CMIP, http://www-pcmdi.llnl.gov/projects/cmip). Die wohl wichtigste Leistung von WGCM ist die internationale Koordinierung der Grundlage für die Berichte des **I**ntergovernmental **P**anel on **C**limate **C**hange (IPCC, http://www.ipcc.ch) bezüglich der Modellierung gegenwärtiger und zukünftiger Klimaschwankungen unter Einschluss der Einwirkungen des Menschen.

In den vergangenen 25 Jahren hat das WCRP drei weitere Projekte durchgeführt und sehr erfolgreich abgeschlossen:

Arctic Climate System Study (ACSYS)

ACSYS befasste sich von 1994 bis 2003 mit der Beobachtung und Modellierung des arktischen Ozeans, der darüber liegenden Atmosphäre und des durch beide Medien bewegten Meereises (http://acsys.npolar.no). Untersucht wurde die Rolle der Arktis im globalen Klimasystem, insbesondere aber der Süßwasserexport aus der Arktis, der auf Schwankungen der Tiefenwasserbildung im Nordatlantik einwirkt und damit auch die globale thermohaline Zirkulation beeinflusst.

World Ocean Circulation Experiment (WOCE)

WOCE hat von 1990 bis 2002 in der bisher größten internationalen ozeanographischen Messkampagne Beobachtungen aus allen Weltmeeren zusammengetragen und damit die Basis für die Untersuchung von Klimaänderungen im Ozean und für die Entwicklung von realistischen numerischen Modellen der globalen Ozeanzirkulation gelegt (http://www.woce.org).

Tropical Ocean – Global Atmosphere Project (TOGA)

TOGA beschäftigte sich von 1985 bis 1994 mit der Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen dem tropischen Ozean und der globalen Atmosphäre und trug wesentlich zum Verständnis der Ursachen der Südlichen Oszillation und des dazugehörigen El Niño-Phänomens bei. Die in diesem Projekt entwickelten Messnetze und Modellsysteme führten zu einer deutlichen Verbesserung der saisonalen Klimavorhersage in den Tropen.

Herausragende Ergebnisse der vergangenen 25 Jahre

Durch die internationale Koordination des WCRP sind in den vergangen 25 Jahren deutliche Verbesserungen im Bereich der Klimabeobachtungssysteme, des Verständnisses der grundlegenden physikalischen Prozesse und der darauf aufbauenden numerischen Klimamodellierung zu verzeichnen. Dies gilt für alle Komponenten des Klimasystems. Zum Beispiel hat GEWEX eine inzwischen WCRP-übergreifende Aktivität ins Leben gerufen (**C**oordinated **E**nhanced **O**bserving **P**eriod, CEOP), die möglichst viele der zurzeit laufenden Beobachtungen zum Wasserkreislauf zusammenfasst um eine bessere Niederschlagsvorhersage zu erreichen (Abb.2).

Ein umfangreiches Beobachtungssystem für den Weltozean (Argo) wurde von WOCE und CLIVAR eingerichtet, das mit nahezu 2000 Tiefendriftern (Abb. 3) inzwischen fast einen ähnlichen Umfang hat wie die offiziellen Wetterstationen auf den Kontinenten. Diese Drifter tauchen bis zu 2000 m tief in den Ozean ab, treiben 10 Tage mit der Strömung mit und messen beim Auftauchen verschiedene ozeanische Parameter, die sie an der Meeresoberfläche über Satelliten übertragen. Danach tauchen sie wieder in die vorgesehene Tiefe ab. Diese Tauch-Messzyklen können sie über mehrere Jahre durchführen.

Auch im Bereich der Polargebiete war die internationale Zusammenarbeit sehr erfolgreich. Unter anderem wurden Satellitendaten durch groß angelegte Validierungsexperimente mit Bodenbeobachtungen geeicht. Außerdem wurden Algorithmen optimiert und Sensoren verbessert, so dass nun für viele Klimaparameter fast 30-jährige homogene Zeitserien vorliegen, z.B. für die arktische und antarktische Meereisbedeckung (Abb. 4). Aus diesen Zeitserien ist ersichtlich, dass das Meereis in der Arktis nach einem Anstieg in der Mitte der 70er Jahre von 1978 bis 1990 eine deutliche Abnahme zu verzeichnen hat, und seitdem bis auf kleine Schwankungen konstant geblieben ist. In der Antarktis nimmt die Meereisfläche dagegen nach einem drastischen Rückgang in den 70er Jahren seit 1980 langsam wieder

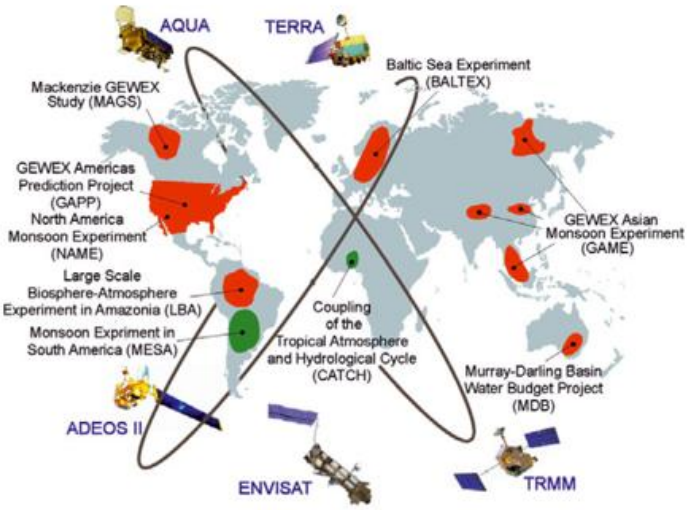


Abb.2: Nutzung der GEWEX Continental-Scale Experiments und der neuen Serie der Erdbeobachtungssatelliten durch CEOP (http://www.ceop.net/).

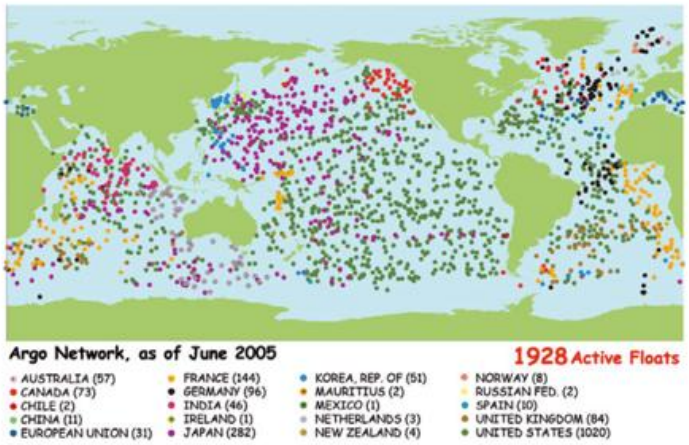


Abb. 3: Verteilung der Argo-Tiefendrifter im Juni 2005, gekennzeichnet nach nationalen Beiträgen (http://www.argo.ucsd.edu/).

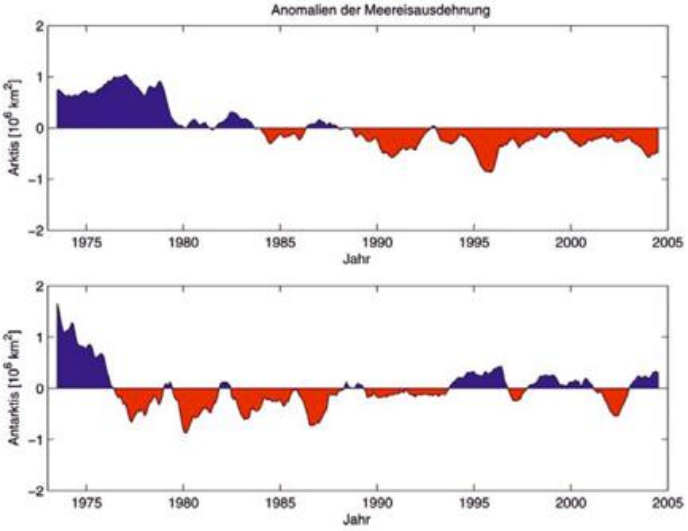


Abb. 4: Zeitliche Entwicklung der Anomalien der gesamten Meereisfläche in Arktis (oben) und Antarktis (unten) von Januar 1973 bis Dezember 2004 (Datenquelle: UK Meteorological Office). Gezeigt sind die Abweichungen von den langjährigen Monatsmittelwerten. Im Jahresmittel bedeckt das Meereis in der Arktis 12,35 Millionen km² und in der Antarktis 12,63 Millionen km².

zu. Offensichtlich haben die beiden Polargebiete eine unterschiedliche Entwicklung durchgemacht. Der langfristige Trend ist in beiden Polargebieten von ausgeprägten kurzzeitigen Schwankungen überlagert.

Ein herausragendes Ergebnis aus dem Bereich der Stratosphärenforschung war die Entdeckung der deutlichen Abkühlung in der Stratosphäre (Abb. 5), die mit der Höhe zunimmt und zu einem wesentlichen Teil auf den Ozonschwund in diesem Bereich zurückzuführen ist.

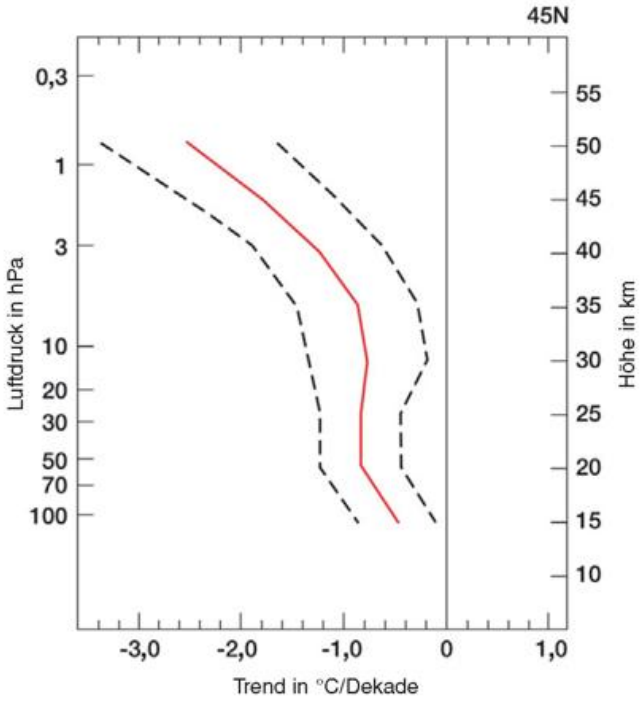


Abb. 5: Mittleres Vertikalprofil (rot) des Temperaturtrends (°C/Dekade) in der Stratosphäre von 1979 bis 1994 ermittelt durch Daten von Radiosonden und Satelliten. Die gestrichelten Linien zeigen den Bereich der doppelten Standardabweichung (Ramaswamy et al., Rev Geophys. 39, 71-122 (2001)).

Coordinated Observation and Prediction of the Earth System (COPES)

Basierend auf den großen Erfolgen in der Verbesserung der Beobachtungssysteme und der numerischen Modelle ist das Verständnis der Klimavariationen deutlich gestiegen. Saisonale Klimavorhersagen für die Tropen (El Niño) werden inzwischen mit sehr vielversprechenden Ergebnissen in mehreren Forschungszentren durchgeführt. Die Ausweitung der Vorhersage auf mittlere und höhere Breiten, auf längere Zeitskalen und auf andere Komponenten des Erdsystems, wie z. B. den Kohlenstoffkreislauf und die Biosphäre im Meer und auf den Kontinenten, ist das erklärte Ziel von COPES, dem neuen strategischen Rahmenprogramm des WCRP (http://www.wmo.ch/web/wcrp/copes.html). COPES soll die Grundlage bilden für eine einheitliche und nahtlose Vorhersage von Klimaänderungen über Zeitskalen von Wochen bis hin zu Jahrhunderten. Ebenso sollen auf lange Sicht auch die bis jetzt als Szenarien durchgeführten Klimaprognosen als Anfangswertprobleme behandelt werden. Als aktuelle Themen gelten die jahreszeitlichen Vorhersagen in höheren Breiten, die Vorhersage der Monsune und die Bestimmung der Meeresspiegeländerungen.

Earth System Science Partnership

In den letzten Jahren wurden neben disziplinären Fragen in verstärktem Maße Wechselwirkungen zwischen physikalischen, biologischen, geologischen und chemischen Komponenten des Klimasystems untersucht und auch deren Relation zu Änderungen der Gesellschaftssysteme betrachtet. Aus diesem Grund haben die vier großen internationalen Umweltprogramme WCRP, IGBP (**I**nternational **G**eosphere **B**iosphere **P**rogramme, gegründet 1986), IHDP (**I**nternational **H**uman **D**imensions **P**rogramme on Global Environmental Change, gegründet 1990) und DIVERSITAS (International Programme of Biodiversity Science, Neugründung 2001) im Juli 2001 die **E**arth **S**ystem **S**cience **P**artnership (ESSP) gegründet. ESSP soll die gemeinsamen interdisziplinären Projekte fördern, von denen zunächst vier definiert wurden: Carbon, Food, Water und Health (siehe http://www.essp.org). Es wird erwartet, dass neben diesen globalen Aktivitäten auch regionale interdisziplinäre Projekte eingerichtet werden.

Ein bilaterales Projekt, das WCRP und IGBP zusammen unterstützen, ist SOLAS (**S**urface **O**cean – **L**ower **A**tmosphere **S**tudy, http://www.uea.ac.uk/env/solas/), das sich mit den physikalischen und bio-geo-chemischen Wechselwirkungen des Ozeans mit der Atmosphäre befasst.

Anschrift des Autors:

Prof. Dr. Peter Lemke
Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung
Bussestraße 24
27570 Bremerhaven
E-Mail: plemke@awi-bremerhaven.de

promet, Jahrg. 31, Nr. 2–4, 201-208 (Oktober 2005)
© Deutscher Wetterdienst 2005

O. KOPATZ

Institutionalisierung der Meteorologie in Deutschland und Gründung der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft

Institutionalisation of the Meteorology in Germany and the foundation of the German Meteorological Society

Zusammenfassung
Die im Jahre 1983 gegründete Deutsche Meteorologische Gesellschaft gehört zu einer der ältesten nationalen wissenschaftlichen Fachgesellschaften. Von engagierte Meteorologen wurde sie mit Tatkraft und Umsicht unter teilweise widrigen Umständen gegründet und nahm in kurzer Zeit national und auch international eine geachtete Stellung ein. Die DMG ist in eine achtbare Tradition eingebunden und wert, dass ihre Vitalität bewahrt wird.

Abstract
The German Meteorological Society (DMG) was founded in 1883. Thus it is one of the oldest national scientific societies. The contribution shows the encouragement of the meteorologists forming this society despite adverse conditions. DMG positioned itself within a short time in the national and international community. Nowadays it is without doubt that DMG has a respectable tradition and is worth that its vitality should be preserved.

1 Einleitung

Die Meteorologie erhielt in Deutschland ihre nationale wissenschaftliche Fachgesellschaft im November 1883, ein Dutzend Jahre nach der Reichsgründung und, wie die Darstellung zeigen wird, nicht ohne wesentlichen Bezug zum Prozess des wirtschaftlichen, kulturellen und politischen Zusammenwachsens der deutschen Teilstaaten. Die Meteorologie legitimierte und beanspruchte im neu entstandenen Reich einen eigenständigen Platz im Wissenschafts- und Staatsgefüge. Der Prozess der Institutionalisierung war in den entwickelten europäischen und nordamerikanischen Staaten deutlich vorangeschritten. In den 70er Jahren des 19. Jahrhunderts bestanden in den wichtigsten europäischen Staaten sowie in den USA und Kanada bereits relativ dichte Netze meteorologischer Stationen, siehe Tab. 1.

Die in den einzelnen Ländern vorhandene Stationsdichte kann als ein zuverlässiges Maß für das allgemein erreichte Niveau der wissenschaftlichen Reife und staatlichen Institutionalisierung der Meteorologie betrachtet werden, wobei in den meteorologischen Beobachtungsnetzen die in der Frühzeit ihrer Einrichtung typischen Mängel wie lokale Einengung, territoriale Abgrenzung und relativ kurze Lebensdauer systematisch ausgemerzt wurden. Mit dem Eintritt in die zweite Hälfte des Jahrhunderts, insbesondere nach der 1853 durchgeführten Brüsseler Konferenz über maritime Meteorologie, wurden diese Art „kinderkrankheitsbedingten" Defizite in zahlreichen Ländern nahezu gleichzeitig und dauerhaft überwunden.

Land	Stationen*			Jahresausgaben in SFr		
	I.	II.	III. Ordnung	Personal-	Sachkosten	Gesamt
Baden		12	4	keine Angaben		
Bayern	1	7				10.565
Belgien	keine Angaben			18.550	8.050	26.600
Dänemark	1	16	160	14.650	6.725	21.375
Hamburg	6	4	1			79.375
Holland	2	3	5	24.975	57.275	82.250
Italien	8	20	54	keine Angaben		
Norwegen		32	18	15.000	12.000	27.000
Österreich	5	120	78	30.500	19.425	49.925
Portugal		11	5			10.825
Preußen		85	25	29.925	7.325	37.250
Russland	8	101	20			297.500
Sachsen	1	20	7			18.700
Schweden	1	28		22.875	4.525	27.400
Schweiz	3	45	20			16.000
Ungarn	2	84	12			32.500
USA	88	11	3			2.571.050
Canada	11	38	58			88.325

Tab. 1: Netze meteorologischer Stationen in Europa und Nordamerika im Jahre 1876 aus [1].
* Eine Station I. Ordnung erfasste und veröffentlichte wenigstens stündlich Messdaten aller wichtigen meteorologischen Parameter, während eine Station II. Ordnung die Messdaten mindestens viermal täglich aufnahm. Stationen III. Ordnung erfassten nur einmal täglich bzw. unregelmäßig einzelne meteorologische Parameter.

2 Das erste Internationale Polarjahr

Die Gründung der **D**eutschen **M**eteorologischen **G**esellschaft (DMG) erfolgte im Kontext zunehmender internationaler Kooperation. Ihr ging das Internationale Polarjahr unmittelbar voraus. Es war eine der bedeutendsten Leistungen in der länderübergreifenden Forschungsorganisation während des letzten Jahrhunderts, maßgeblich initiiert und geführt von Meteorologen, mit an der Spitze jener aus dem deutsch sprechenden Raum.

Auf dem zweiten Internationalen Meteorologenkongress 1879 in Rom schlug der österreichische Marineoffizier K. Weyprecht (er entdeckte als Leiter der Polarexpedition 1872-74 die von ihm mit ‚Kaiser-Franz-Joseph-Land' benannte arktische Inselgruppe) vor, das Polargebiet im Rahmen internationaler Zusammenarbeit systematisch zu erforschen [2]. Sein Vorschlag bedeutete den völligen Bruch mit den bisherigen Motiven und Zielen von Polarexpeditionen. Bis dahin war jede auf diesem Feld aktive Nation bemüht, der anderen den Rang abzulaufen und ihre Flagge, wenn schon nicht auf dem Pol selbst, so doch in möglichst hoher geografischer Breite aufzupflanzen. An dieser vordergründig politischen Zielstellung hatten auch die wissenschaftlich untadeligen Absichten engagierter Forscherpersönlichkeiten wenig ändern können. Der Kongress erörterte den Antrag von Weyprecht sowie einen ergänzenden Vorschlag von Georg Neumayer, dem Direktor der Deutschen Seewarte in Hamburg, das Südpolargebiet in die Forschungen einzubeziehen und kam zu der Ansicht, dass Fragen von so weitreichender Bedeutung auf einer gesonderten Konferenz beraten werden sollten.

Die Konferenz fand vom 1. bis 7. Oktober 1879 im Deutschen Seemannshaus in Hamburg, damals noch Sitz der Seewarte, statt. Beteiligt waren Vertreter – fast ausschließlich Meteorologen – aus Deutschland, Österreich, Russland, Frankreich, Holland, Norwegen, Dänemark und Schweden. England und die USA hatten eine Teilnahme am Forschungsprogramm schriftlich in Aussicht gestellt. Kernstück des vereinbarten Internationalen Polarjahres sollte nach den Hamburger Beratungen die Errichtung von festausgebauten Stationen an ausgewählten Standorten (Spitzbergen, Nordkap, Nowaja Semlja, Lenamündung, Nordspitze Alaskas, Nordkanada, Ost- und Westgrönland) zur Messung von meteorologischen, aber auch von magnetischen, hydrologischen und glaziologischen Parametern für mindestens einen Jahreszyklus sein. Die Kosten für die Errichtung und den Betrieb der Stationen sollten jeweils die teilnehmenden Staaten oder Institutionen tragen. Die Konferenz schlug vor, das Polarjahr in Anbetracht der für diese Zeitspanne zu erwartenden zyklischen Periode höchster Sonnenaktivität vom Sommer 1881 bis zum Sommer 1882 durchzuführen. Damit war Eile geboten. Die Vorbereitung und Koordinierung der Arbeiten oblag der zu diesem Zweck gebildeten Internationalen Polarkommission, der Vertreter aller teilnehmenden Länder angehörten und die G. Neumayer zum Vorsitzenden wählte.

Im Anschluss an die Konferenz verfassten Neumayer und der Leiter des Hydrographischen Amtes, Admiral Frh. G. von Schleinitz, gemeinsam eine vom 13. Januar 1880 datierte Denkschrift, die das mit der beabsichtigten Errichtung von zwei deutschen Polarstationen (Ostgrönland und Süd-Georgien in der Antarktis) verbundene wissenschaftliche Anliegen darlegte und die erforderlichen Angaben über die dafür notwendigen organisatorischen Voraussetzungen und finanziellen Mittel enthielt. [3]. Diese Denkschrift wurde über den Chef der Admiralität General A. von Stosch – der die Gründung der DMG förderte und ihr dann auch beitrat – im März 1880 dem Reichsamt des Innern eingereicht, in der Hoffnung, dass bis zur zweiten Polarkonferenz im August 1880 die deutsche Beteiligung gesichert sein würde. Dänemark, Holland, Italien, Norwegen, Österreich, Russland und Schweden hatten zu diesem Zeitpunkt ihre abgesicherte Teilnahme am Polarjahr erklärt.

In Deutschland nahm die Angelegenheit jedoch nicht den erhofften Verlauf. Die Reichsregierung lehnte die in der Denkschrift unterbreiteten Vorschläge aus finanziellen Gründen ab. Dieser Entscheid kam für die deutschen Initiatoren, die sich mit der Einladung der Konferenz nach Hamburg und der Übernahme des Vorsitzes in der Polarkommission in gewissem Maße an die Spitze dieser internationalen Aktivität gestellt hatten, unerwartet und traf sie empfindlich. Die Ablehnung wurde aber keineswegs einfach hingenommen. Die Entscheidung über die Teilnahme am Internationalen Polarjahr gestaltete sich zu einem handfesten Kräftemessen zwischen den Vertretern der Meteorologie und dem mächtigen Reichskanzler Otto von Bismarck.

Das Fehlen einer DMG erwies sich als großer Nachteil. In dieser Situation sprang die Gesellschaft für Erdkunde in Berlin in die Bresche, in deren Leitungsgremien die Meteorologen stets einflussreiche Funktionen innehatten. Vorstand und Beirat der Gesellschaft übersandten dem Bundesrat als höchster Reichsbehörde eine Eingabe, um eine positive Entscheidung zu erwirken. Außerdem wurde die Angelegenheit in den Reichstag gebracht. In der Sitzung vom 14. März 1881 stellte R. Virchow gemeinsam mit den Abgeordneten G. Thilenius und v. Wedell-Malchow den Antrag: *„Der Reichstag wolle beschließen, den Herrn Reichskanzler zu ersuchen, er wolle geeignete Maßnahmen treffen, um eine Betheiligung Deutschlands an der Erforschung der Polargegenden, zunächst im Interesse der Meteologie...in Verbindung mit anderen Nationen, welche in gleicher Richtung vorzugehen bereit sind, herbeizuführen."* [4].

Dieser Antrag und die durchdachte, eindringliche Begründung zwangen die Reichsregierung zu einer offiziellen Stellungnahme, die der Staatsminister des Innern K. H. von Bötticher abgab. *„Meiner Herren, die Reichsregierung steht den Bestrebungen, die gerichtet sind auf die Erforschung der Polargegenden sehr sympathisch gegenüber...Es ist auch ein Schriftwechsel zwischen den betheiligten Reichsressorts eingeleitet...allein dieser Schriftwechsel hat bis jetzt nicht zu dem Resultat geführt, daß Ihnen durch den gegenwärtigen Etat ein Vorschlag auf Dotierung ...hätte gemacht werden können...Für jetzt, wie gesagt, hat die Reichsregierung Abstand genommen, Ihnen den Vorschlag zu machen, eine so hohe Summe ... im Etat bereit zu stellen."* [5].

Sollte damit rigoros der Stab über jenes zukunftweisende, von deutschen Meteorologen so engagiert betriebene Projekt gebrochen sein? Das konnte und durfte nicht einfach hingenommen werden. Im Mai 1881 wurde in einer zweiten Denkschrift über die inzwischen erzielten bemerkenswerten Fortschritte bei der Vorbereitung des Forschungsprojektes, die auch ohne deutsche Beteiligung einen überragenden Erfolg verhießen, berichtet und erneut auf die Teilnahme gedrängt [6].

Offenbar gelang es Neumayer bzw. einflussreichen Vertretern der Admiralität, den Kaiser selbst gegen den Willen Bismarcks und der Regierung für eine deutsche Beteiligung zu gewinnen und damit eine Wende in der Sache herbeizuführen. Als Kaiser Wilhelm I. am 14. September 1881 mit ‚allerhöchstem Zeremoniell' in Anwesenheit zahlreicher namhafter Meteorologen des In- und Auslandes das neue, modern ausgestattete Gebäude der Deutschen Seewarte seiner Bestimmung übergab, ließ er verlauten, dass dem Reichstag eine zustimmende Vorlage zugeleitet werden würde. So geschah es auch. In den Etat für das Finanzjahr 1882/83 wurden für die offizielle Teilnahme des Deutschen Reiches an der Polarforschung 300.000 Mark bewilligt, obwohl ursprünglich nur 100.000 Mark gefordert worden waren.

Damit war für die Arbeit der Deutschen Polarkommission grünes Licht gegeben. Sie trat am 12. Dezember 1881 in Berlin zusammen und legte in sechstägigen Beratungen das Programm, die Organisation sowie die materielle und personelle Sicherstellung des deutschen Beitrages fest. Den Vorsitz hatte G. Neumayer inne, sein Stellvertreter war Admiral von Schleinitz, weiter gehörten ihr die Professoren W. Förster, H. v. Helmholtz, W. v. Bezold und C. Börgen (Vorsteher des Kaiserlichen Observatoriums in Wilhelmshaven) sowie die Herren Dr. Nachtigall (Vorsitzender der Gesellschaft für Erdkunde in Berlin) und Dr. P. Schreiber an. Allerdings verweigerte die Admiralität, obwohl sie in diesem Gremium maßgeblich vertreten war, die erhoffte Zusage für eines ihrer Schiffe. Daher musste der ursprüngliche Plan, eine Beobachtungsstation in Ostgrönland zu errichten, aufgegeben werden. Als Notlösung ließ die Polarkommission die bereits zehn Jahre zuvor außer Dienst gestellte 'Germania', die bei der ersten deutschen Grönland-Nordpol-Expedition im Jahre 1868 eingesetzt worden war, als Expeditionsschiff wieder flott machen.

Ungeachtet dieser und anderer Schwierigkeiten wurde das Polarjahr zu einem vollen Erfolg, der die Zweckmäßigkeit planvoll organisierter internationaler Forschungsvorhaben überzeugend bestätigte. Damit wurde eine Tradition begründet, in größeren Abständen komplexe geophysikalische Forschungsvorhaben weltweit zu organisieren. Am zweiten Internationalen Polarjahr 1932/33 beteiligten sich 49 Staaten, beim Internationalen Geophysikalischen Jahr 1957/58 wirkten 64 Staaten zusammen. Die Erfahrungen des Polarjahres und der ersten internationalen Meteorologenkongresse zeigten, dass sich eine dauerhafte internationale Kooperation auf stabile nationale Organisationen stützen muss. Von hier gingen starke Impulse zur Gründung einer Deutschen Meteorologischen Gesellschaft aus.

3 Die Situation nach der Reichsgründung

Nachdem Deutschland mit der Reichsgründung 1871 zu einer europäischen Großmacht aufgestiegen war, konnte erwartet werden, dass von dem durch den nationalen Markt, die allgemein verbindliche Rechtsordnung, die einheitliche Währung und das gleiche Maß- und Gewichtssystem begünstigten Aufschwung von Wirtschaft, Handel und Verkehr auch praxisnahe Wissenschaftszweige wie die Meteorologie profitieren würden. Vor allem konnte damit gerechnet werden, dass nach dem Vorbild anderer europäischer Staaten, mit denen das neue Reich rivalisierte, rasch ein staatlicher Wetterdienst eingerichtet werden würde. Dies war jedoch zunächst nicht der Fall. Zum Wert der Meteorologie wurden konträre Standpunkte vertreten; der Kampf um ihre gesellschaftliche Anerkennung musste teilweise sehr heftig gegen listenreiche Praktiken starker Widersacher geführt werden.

In dieser Situation verstärkte sich der Druck jener Kreise, die an Wetterprognosen ökonomisch interessiert waren [7]. Auf Drängen von Gutsbesitzerorganisationen bemühte sich das preußische Ministerium für Landwirtschaft Ende 1876 – allerdings vergeblich – darum, den telegrafischen Dienst der Seewarte für Wetternachrichten über den Bereich der Küste hinaus auch für das Binnenland zu nutzen. Energische Fürsprecher der Meteorologie warfen auch im Reichstag dringende Fragen zur Organisation eines staatlichen Wetterdienstes auf. In der Sitzung vom 30. März 1881 stellten die Abgeordneten C. Grad, Dr. G. Karsten und v. Wedell-Malchow den Antrag: *„Den Herrn Reichskanzler zu ersuchen, die erforderlichen Maßnahmen zu treffen, um einen billigeren und rascheren Bezug der Depeschen für Witterungsberichte zum praktischen Gebrauch der Landwirtschaft und Industrie im Deutschen Reich herbeizuführen."* [8]. Hatte doch die stürmische Entwicklung der industriellen Großproduktion einen echten Bedarf an meteorologischen Dienstleistungen geweckt.

Der energische und sehr angesehene Staatssekretär der Post- und Telegraphenverwaltung, Dr. H. Stephan, versuchte recht geschickt, diesen Antrag zu Fall zu bringen. *„Der Antrag hat ja eine ganz praktische Seite und im Gegensatz zu den Erscheinungen am Himmel, mit denen sich die Meteorologie sonst zu beschäftigen pflegt, fasst er eine leider nur zu häufige Erscheinung auf der Erde ins Auge: nämlich das Bezahlen (Heiterkeit). Ich glaube, wir werden wohltun, wenn wir uns auf diese Seite der Sache beschränken."* [9]. Er verwies auf

ein bestehendes Gesetz, dass 'nur solche Gebührenfreiheiten anerkannt werden, welche sich auf Reichsdienstangelegenheiten und Reichsbehörden beschränken'. Der taktische Schachzug Stephans bestand darin, dass unter dieser Prämisse zunächst der Antrag auf die Schaffung einer Reichsinstitution gestellt und beschlossen werden müsste.

Doch auch den Verfechtern der Meteorologie im Parlament mangelte es nicht an taktischem Geschick. Der Abgeordnete v. Wedell-Malchow parierte die Argumente des Staatssekretärs, indem er einräumte, *„...daß die Zwecke, welche wir mit dem Antrag verfolgen, nur erreicht werden können, wenn die Witterungskunde in ihrer oberen Leitung überhaupt, namentlich soweit sie sich auf schnelle Verbreitung der Depeschen bezieht, dem Reich übergeben wird. Es ist dies auch das Naturgemäßeste, denn bekanntlich kehrt sich das Wetter nicht an die Landesgrenzen"* [10]. Der Antrag wurde mit großer Mehrheit angenommen; dazu dürfte sowohl die kluge Begründung als auch die praktische Demonstration der Vorzüge von Wetterberichten – täglich wurden die Berichte der Deutschen Seewarte mit den Vorhersagen für den nächsten Tag im Foyer des Sitzungssaales angebracht – entscheidend beigetragen haben.

Die öffentliche Polemik kann als ein Indiz dafür gewertet werden, dass die Meteorologie, deren disziplinäre Eigenständigkeit in der Wissenschaft bereits anerkannt war, nunmehr auch in der Struktur staatlicher Einrichtungen mit Nachdruck ihren Platz beanspruchte. Am 20. November 1882 richtete der Landesdirektor der Provinz Ostpreußen im Auftrag des Provinzialausschusses als der höchsten regierungsamtlichen Körperschaft eine Eingabe an den Reichskanzler, den Wettertelegrammen des einzurichtenden Stationsnetzes den Vorrang vor allen Privatdepeschen zu geben. Die Eingabe wurde unter Hinweis auf noch laufende Verhandlungen über eine einheitliche Organisation des Wetterdienstes – wiederum eine fadenscheinige Ausrede für eine indirekte Abweisung – abgelehnt. Damit gab sich der Provinzialausschuss jedoch keineswegs zufrieden, sondern fasste einen erneuten Beschluss zur Beschleunigung des Verfahrens.

Bismarck versuchte in einem an den Finanzminister gerichteten Votum vom 8. März 1883, das er allen Staatsministern abschriftlich übersandte, diesem Anspruch und dem Beschluss des Reichstages offensiv zu begegnen. *„Meines ergebensten Dafürhaltens wird es sich für die Königliche Staatsregierung nicht empfehlen, ein Netz von offiziellen Witterungs-Haupt- und Nebenstationen einzurichten. Ein solcher Apparat würde bei einem großen Theil der ländlichen Bevölkerung den Glauben an irgend ein Maß von amtlicher Zuverlässigkeit erwecken, während in Wirklichkeit dieses Maß geringer als jede Schätzung sein würde, da die Witterungsvorgänge, auf die es in der Landwirtschaft ankommt, nur zu häufig auf derselben Quadratmeile die stärksten Gegensätze entwickeln... Die Staatsbehörden würden schwer an der Verantwortlichkeit für die Enttäuschungen zu tragen haben, ...welche das gläubige Vertrauen durch mißglückte Vorhersagen erleiden würde... Dieser Fall würde bei der bisherigen Entwicklung der meteorologischen Wissenschaft häufig eintreten. Es ist nicht nützlich, das Feld für böswillige Kritik und feindliche Bearbeitung der Bevölkerung gegen die Regierung zu vergrößern, und ich möchte deshalb davon abrathen, daß die Königliche Regierung durch amtliche Organisation des Wetterbeobachtungsdienstes irgendwelche Verantwortlichkeit für die locale Zuverlässigkeit von Wetterprophezeiungen übernehme."* [11].

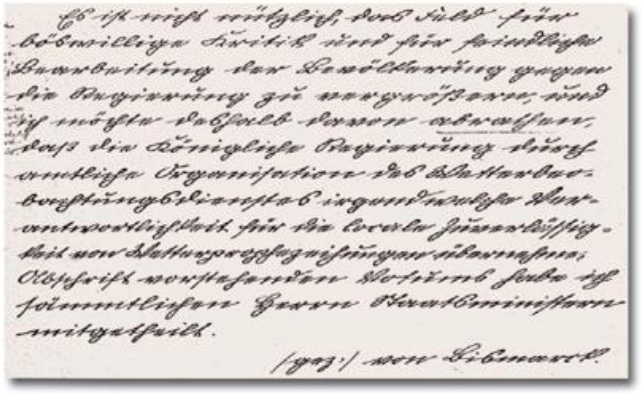


Abb. 1: Votum des Minister-Präsidenten betreffend den Wetterbeobachtungsdienst, aus [11].

Ende der 70er Jahre war in der Öffentlichkeit und Wirtschaft ein bemerkenswert starkes Interesse an meteorologischen Forschungen zu verzeichnen. In der Presse wurden immer nachdrücklicher Forderungen nach einem wissenschaftlich geführten Wetterdienst erhoben. Einige einflussreiche Presseorgane ergriffen in dieser Richtung beachtliche Initiativen. Die „Magdeburgische Zeitung", die „Cölnische Zeitung", das „Berliner Tageblatt" veröffentlichten mit erheblichem Kostenaufwand eine tägliche Wetterkarte. Diese Karten wurden nach den telegrafisch übermittelten Werten der Deutschen Seewarte angefertigt und für den Druck aufbereitet. Natürlich konnten diese aufwendigen und kostenintensiven Initiativen einzelner privater Unternehmen keine Dauerlösung bringen, doch sie erfüllten eine wertvolle Überbrückungsfunktion auf dem Weg zu einer stabilen Regelung.

Im Jahre 1880 richtete die „Cölnische Zeitung" eine Wetterwarte für das Rheinland unter Leitung von Dr. H. Klein ein, die die Zeitung täglich mit regionalen Wettervorhersagen versorgte. In Berlin verdient das Wirken von Richard Börnstein, Professor an der Landwirtschaftlichen Hochschule, für die Belange der praktischen Witterungskunde eine besondere Erwähnung. Gemeinsam mit seinem Assistenten Dr. E. Less gründete er mit dem Einverständnis des Landwirtschaftsministeriums 1884 das „Berliner Wetterbüro", das die dreimal täglich von der Hamburger Seewarte übermittelten Wettertelegramme zu einer lokalen Vorhersage aufbereitete, die bereits in zahlreichen Abendzei-

tungen erschien und auch von den Morgenzeitungen übernommen wurde. Vom Eintreffen der letzten Depesche bis zur Auslieferung der druckfertigen Karte an die Redaktionen standen nur 75 Minuten zur Verfügung. Am 1. November 1886 verkündete die „Königlich privilegierte Berlinische Zeitung", das damals auflagenstärkste Blatt in Preußen, in ihrer Abendausgabe, dass erstmals eine synoptische Wetterkarte vom atlantisch-europäischen Raum mit den Beobachtungswerten vom gleichen Tage abgedruckt würde.

Die damals wohl bedeutendste Initiative ging von Dr. Richard Aßmann aus, der mit Unterstützung der Besitzer der „Magdeburgischen Zeitung", der Brüder A. und R. Faber, 1880 den Bau einer beispielhaft ausgerüsteten Wetterwarte zuwege brachte. Auf dem Gelände der Druckerei wurde als Gebäude der Wetterwarte auf einem fünf Meter tief gegründeten Fundament ein massiver, bis zur Spitze 34 Meter hoher Turm errichtet. Im Erdgeschoss wurden die selbstregistrierenden Geräte, in den oberen Stockwerken die Labor- und Arbeitsräume sowie die Fachbibliothek untergebracht. In 17 Meter Höhe wurde eine Wetterhütte installiert. Das oberste Geschoss wurde als Observatorium eingerichtet. Die Seitenwände und das Dach waren aus starkem Bleiglas gefertigt und in Eisenrahmen eingefasst. Rings um den Turm führte in 32 Meter Höhe eine Galerie, die auf der Nordseite mit einer zweiten Wetterhütte und auf der Südseite mit einem Sonnenscheinschreiber sowie einem Wind- und Regenmesser versehen war. Die Warte war mit Wolkenspiegeln, Wolkenkamera, Spektroskop und einem starken Fernrohr für die Fernsicht zum 80 km entfernten Brocken im Harz ausgerüstet.

Nahe der Warte wurde ein Wettergarten mit einer großen Wetterhütte in freier Umgebung eingerichtet. Ebenso beispielhaft wie die Ausstattung der Warte waren ihre personelle Besetzung und ihre Arbeitsweise. Geleitet wurde die Einrichtung von R. Aßmann. Ihm zur Seite standen noch ein Assistent und ein Gehilfe. Die Messungen wurden täglich fünfmal vorgenommen und bildeten zusammen mit den um 11 Uhr und 12 Uhr von der Deutschen Seewarte eingehenden Wettermeldungen die Grundlage für den täglichen Wetterbericht und die Wettervorhersage in der Abendausgabe der „Magdeburgischen Zeitung", die bereits um 13 Uhr in 5000 Exemplaren ausgedruckt mit den Mittagszügen abgesandt wurde. Die um 14 Uhr eintreffende dritte Wettermeldung der Seewarte diente als wichtigste Information für die täglich in der Morgenausgabe erscheinende Wetterkarte, die bis 15 Uhr für den Druckprozess gezeichnet vorliegen musste. Die Herstellung erfolgte nach einem englischen Patent. Dafür wurden zwei Graveure eingestellt, damit die Karte um 19 Uhr druckfertig war.

Um die Wetterwarte für die meteorologische Betreuung der Landwirtschaft wirksamer zu machen und auch für die erheblichen Kosten eine Finanzquelle zu erschließen, gründete Aßmann im April 1881 den „Verein für landwirtschaftliche Wetterkunde", der im Rahmen bestehender landwirtschaftlicher Vereine 6000 Mitglieder zählte. Aßmann erwies sich als talentierter Organisator. Er gewann die Vereine für die Idee und die vertragliche Vereinbarung, die vorsah, dass jeder beteiligte Verein einen jährlichen Beitrag von 60 Pfennigen je Mitglied als Kostenanteil für die Errichtung eines gut funktionierenden Stationsnetzes entrichtete. Es wurden 20 Stationen II. Ordnung und 30 Stationen III. Ordnung geschaffen. So berichteten die Stationen Jena, Arnstadt, Nordhausen, Wolfenbüttel, Salzwedel und Brandenburg täglich telegrafisch, weitere 15 Stationen täglich auf einer vorbereiteten Standardpostkarte die gemessenen Werte. Von der Wetterwarte wurde den landwirtschaftlichen Vereinen und den angeschlossenen Zeitungsredaktionen die tägliche Prognose jeweils bis 12.30 Uhr telegrafisch übermittelt. Im Jahre 1883 war das Netz auf 252 Beobachtungsstationen angewachsen [12].

Erwähnenswert sind ebenfalls bewunderungswürdige persönliche Initiativen. So richtete der Erfurter Brauereibesitzer F. Treitschke, selbst ein leidenschaftlicher meteorologischer Beobachter, von seinem Vermögen in Erfurt eine meteorologische Station ein und stellte für diese einen Beobachter an. Auf eigene Kosten errichtete er auf dem Inselsberg und auf der Oberhofer Schmücke im Thüringer Wald meteorologische Stationen und stattete diese mit den damals modernsten Instrumenten und Registriergeräten aus. Wie die Praxis zeigte, waren diese vom Engagement begeisterter Enthusiasten, aufrichtiger Freunde und begüterter Förderer der jungen Wissenschaftsdisziplin getragenen Selbsthilfeakte weit mehr als nur ein Notbehelf.

Die Erfahrungen der 70er und frühen 80er Jahre hatten den Meteorologen in Deutschland eindringlich vor Augen geführt, dass sie sich bei der Vertretung zentraler fachlicher Anliegen ohne eine gesamtnationale Organisation gegenüber dem Staat – sowohl auf der Ebene des Reiches als auch auf der Ebene einzelner Bundesstaaten, insbesondere Preußens – in einer relativ schwachen Position befanden. Auch die Bedürfnisse der disziplinären Kommunikation ließen es zweckmäßig erscheinen, dass sich die Fachgemeinschaft der Meteorologen in einem territorialen Rahmen konstituierte, der von den politischen Grenzen des Deutschen Reiches bestimmt war.

4 Die Gründung der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft

Die Gründung dieser Fachgemeinschaft wurde von den einflussreichsten Vertretern der Wissenschaftsdisziplin mit besonderem Nachdruck verfolgt. Sie gelangten zu der Überzeugung, dass die Herausgabe einer Fachzeitschrift auf nationaler Ebene, deren Trägerin die angestrebte Gesellschaft sein müsste, den Kristalli-

sationspunkt für den Aufbau eines Netzes dauerhafter Verbindungen zwischen den Meteorologen des Landes bilden könnte. Zahlreiche Meteorologen gehörten der bereits im November 1865 gegründeten österreichischen Gesellschaft für Meteorologie an; doch diese Mitgliedschaft konnte nach der unter Ausschluss Österreichs erfolgten Reichsgründung eine eigene deutsche Fachgesellschaft nicht ersetzen.

Im Hinblick auf den Gründungsort ließen die Schwierigkeiten, die mit der langwierigen Reorganisation des Preußischen Meteorologischen Instituts verbunden waren, die Reichshauptstadt Berlin auf absehbare Zeit wenig geeignet erscheinen. Für diese Rolle war in weit höherem Grade Hamburg disponiert, das mit der gut ausgestatteten Deutschen Seewarte über eine meteorologische Einrichtung verfügte, die unbestrittene fachliche Autorität mit organisatorischem Vermögen verband. G. Neumayer als Direktor der Seewarte sah diese Konstellation und überblickte die Chancen und die Aufgaben, die für die von ihm geleitete Einrichtung daraus erwuchsen. Er sah auch, dass nun zügig gehandelt werden musste und jedes weitere Zögern den Interessen der Meteorologie nur schaden würde.

Als Gründungszeitpunkt schien Ende 1883 besonders geeignet, da eine zu diesem Termin vorgesehene Zusammenkunft der Deutschen Polarkommission ohnehin die bedeutendsten Vertreter der Meteorologie in Deutschland zusammenführen sollte. Nachdem in einem mündlich und schriftlich geführten Meinungsaustausch im Laufe des Sommers die prinzipielle Zustimmung aller namhaften Gelehrten des Gebietes zur Gründung einer Fachvereinigung erfolgt war, sprach der Direktor der Seewarte die Einladung zur Gründung einer Deutschen Meteorologischen Gesellschaft aus. Dieser Einladung gingen eingehende Beratungen mit den leitenden Persönlichkeiten der österreichischen Gesellschaft für Meteorologie voran. Es waren solche Fragen wie die Regelung einer Zweitmitgliedschaft zahlreicher Meteorologen zu klären (Im Jahre 1883 zählte die Gesellschaft 51 Mitglieder, die ihren Wohnsitz in Bundesstaaten des Deutschen Reiches hatten) und die durchaus berechtigte Sorge zu entkräften, das Erscheinen einer zweiten deutschsprachigen Zeitschrift könne das wissenschaftliche Niveau der führenden Fachzeitschrift durch den Verlust von Autoren gefährden. Im gegenseitigen guten Einvernehmen wurde ein für beide Gesellschaften vorteilhafter Konsens gefunden.

Im Anschluss an die Beratungen der Deutschen Polarkommission wurde am 17. und 18. November 1883 in den Räumen der Deutschen Seewarte in Hamburg die DMG gegründet [13]. Die 22 Gründungsmitglieder waren vornehmlich Direktoren und Leiter der wichtigsten meteorologischen Einrichtungen bzw. einflussreiche Vertreter der Wissenschaftsdisziplin, darunter zwei Reichstagsabgeordnete.

Nach einer vorbereitenden Versammlung, die Verfahrensfragen und den von Wladimir Köppen unter Mitwirkung eines Juristen ausgefertigten Statutenentwurf erörterte, erfolgte am 18. November die Bestätigung des überarbeiteten Statuts und die Wahl der Leitungsorgane. Ferner wurde ein Aufruf angenommen, in dem die Bildung der Gesellschaft verkündet und zum Beitritt aufgefordert wurde. In den Vorstand wurden G. Neumayer als Vorsitzender, Wilhelm von Bezold als Stellvertreter sowie zwölf weitere Gründungsmitglieder gewählt.

Die Gründungsmitglieder der Gesellschaft waren, wie es im Aufruf hieß, von *„der Überzeugung durchdrungen, dass die Meteorologie mehr als irgendeine andere Wissenschaft ein organisiertes Zusammenwirken Vieler erfordert und daß dieselbe in keinem anderen Lande einer solchen freiwilligen Zusammenfassung der vorhandenen Kräfte mehr bedarf und mehr wert ist, als in Deutschland mit dessen geschichtlich entwickelter Vielzahl seiner intellektuellen Centren“* [14].

Die Vertreter und Freunde der Meteorologie wurden aufgefordert, ihren Antrag zur Aufnahme in die Gesellschaft schriftlich an eines der 22 Gründungsmitglieder zu richten und auf diese Weise ihren Beitritt zu vollziehen. Mit dieser Aufforderung wurde die Gesellschaft für einen breiten Personenkreis geöffnet, gleich-

Name	Tätigkeit	Ort
1. R. Aßmann	Leiter der Wetterwarte	Magdeburg
2. J. van Bebber	Deutsche Seewarte, Beamter	Hamburg
3. W. von Bezold	Direktor der Met. Centralstation	München
4. C. Börgen	Direktor des Observatoriums	Wilhelmshaven
5. R. Börnstein	Universitätsprofessor	Berlin
6. A. von Danckelmann	Forschungsreisender	Kassel
7. L. Dinklage	Deutsche Seewarte, Kapitän	Hamburg
8. E. Ebermayer	Universitätsprofessor	München
9. G. Hellmann	Interim. Institutsdirektor	Berlin
10. N. Honsell	Institutsleiter	Karlsruhe
11. G. Karsten	Universitätsprof., Reichstagsabg.	Kiel
12. H. Klein	Leiter der Wetterwarte	Köln
13. K. Koch	Universitätsdozent	Freiburg
14. W. Köppen	Deutsche Seewarte, Beamter	Hamburg
15. G. Krebs	Universitätsprofessor	Frankfurt a.M.
16. A. Müttrich	Universitätsprofessor	Eberswalde
17. G. Neumayer	Direktor der Deutschen Seewarte	Hamburg
18. H. von Schoder	Direktor der Met. Centralstation	Stuttgart
19. P. Schreiber	Direktor des Met. Instituts	Chemnitz
20. A. Sprung	Deutsche Seewarte, Beamter	Hamburg
21. G. Thilenius	Arzt, Reichstagsabgeordneter	Soden/Taunus
22. K. Zöppritz	Universitätsprofessor	Königsberg/Pr.

Tab. 2: Gründungsmitglieder der DMG des Jahres 1883.

zeitig ihre enge Verbundenheit mit der österreichischen meteorologischen Gesellschaft erklärt und eine Doppelmitgliedschaft freigestellt. Die zweite allgemeine Versammlung der Gesellschaft, die das Statut endgültig beschließen sollte, wurde parallel zur Versammlung der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte 1884 nach Magdeburg einberufen.

In den Grundsatzbestimmungen des Statuts [15] wurden die Aufgaben und Ziele der Gesellschaft festgeschrieben. § 1 nannte als Zweck der Gesellschaft ausdrücklich die Pflege der Meteorologie als Wissenschaft und ihre praktische Anwendung. Die Bestimmung über den Sitz der Gesellschaft dürfte eine ausgesprochene Kompromisslösung gewesen sein, da aus den bereits erwähnten Gründen Berlin als ständiger Sitz vorerst nicht in Frage kam. Um einen künftigen reibungslosen Übergang des Sitzes der Gesellschaft von einer Stadt in die andere zu ermöglichen, wurde eine von typischen 'Wandergesellschaften' bekannte Regelung getroffen. In der allgemeinen Versammlung sollte für die jeweilige Wahlperiode ein sogenannter 'Vorort' bestimmt werden, der als temporärer Sitz der Gesellschaft gilt. Dieser Vorort war in jedem Fall der Wohnsitz des Vorsitzenden, eines Schriftführers und des Schatzmeisters. Auf der ersten allgemeinen Versammlung wurde der Vorstand in folgender Zusammensetzung gewählt:

1. Vorsitzender	Prof. Dr. G. Neumayer
2. Stellvertreter	Prof. Dr. W. v. Bezold
3. Schriftführer	Dr. J. van Bebber
4. "	Dr. A. Sprung
5. Redakteur	Dr. W. Köppen
6. Schatzmeister	Kfm. E.Bopp
7. Beiratsmitglied	Dr. R. Aßmann
8. "	Dr. G. Hellmann
9. "	Prof. Dr G. Karsten
10. Vorstandsmitglied	Prof. Dr. G. Ebermayer
11. "	Dr. H. Klein
12 "	Prof. Dr. W. Krebs
13. "	Prof. Dr. A. Müttrich
14. "	Prof. Dr. H. v. Schoder
15. "	Dr. P. Schreiber
16. "	Prof. Dr. K. Zöppritz

Tab. 3: Mitglieder des ersten Vorstandes der DMG.

In den Folgejahren gab es nur wenige Änderungen in der Zusammensetzung des Vorstandes, meist Ergänzungswahlen für in der Zwischenzeit verstorbene Mitglieder.

Die Mitgliederbewegung war ein deutliches Indiz dafür, dass die Gründung der Gesellschaft einem berechtigten Anliegen entsprach und in weiten Kreisen eine starke Resonanz fand. Ende 1883, nur wenige Wochen nach der Gründung, betrug die Mitgliederzahl bereits 267, und neun Monate später, zur ersten Jahresversammlung, war sie auf 406 gestiegen. Im folgenden Jahr erhöhte sich der Mitgliederbestand noch einmal um 70, danach pegelte er sich auf ungefähr 400 ein und blieb in der Folgezeit im Wesentlichen konstant.

Die berufliche Zusammensetzung der Mitgliedschaft gibt Aufschluss über die soziale Struktur der DMG. Die Mitgliederliste von Januar 1884 weist 267 Mitglieder aus, die folgenden Berufsgruppen zugeordnet werden können:

1. Meteorologen im Staatsdienst	33
2. Universitätsprofessoren	42
3. Dozenten/Lehrer	44
4. Regierungsbeamte	34
5. Generäle/Offiziere	14
6. Industrielle/Unternehmer	21
7. Kaufleute/Gewerbetreibende	14
8. Gutsbesitzer/Land-/Forstwirte	10
9. Wissenschaftler im Staatsdienst	25
10. Ärzte/ Apotheker	22
11. Sonstige/ohne Berufsangabe	8
Gesamt:	**267**

Tab. 4: Berufliche Zusammensetzung der Mitgliedschaft der DMG im Jahre 1884.

Der Anteil der Berufsmeteorologen war relativ gering. Sie besetzten jedoch sämtliche Führungspositionen. In den Folgejahren erhöhte sich ihre Zahl nur unwesentlich. Der hohe Prozentsatz von Universitätsprofessoren entspricht dem generellen Charakter einer wissenschaftlichen Organisation; zugleich spiegelt er ein typisches Merkmal der Disziplinbildungsperiode, in der die Meteorologie, die noch kaum über eigene Lehrstühle verfügte, häufig von Ordinarien der Nachbardisziplinen mitvertreten wurde. In der Gesellschaft wirkten so bedeutende Physiker wie Hermann von Helmholtz, Phillipp von Jolly, Gustav Kirchhoff und Heinrich Hertz mit. Der Anteil der Militärs zeigt die in jener Periode allgemeine Tendenz der zunehmenden Vermischung und Verschmelzung wissenschaftlicher und militärischer Interessen. Die Liaison war bereits bei der Gründung der DMG offenkundig. Die Deutsche Seewarte war eine Dienststelle der Kaiserlichen Admiralität.

Die bemerkenswerte Anzahl von Industriellen in der Gesellschaft ist ein Phänomen der sich mit dem Fortschreiten der industriellen Revolution vertiefenden Verbindung von Wissenschaft und Industrie. Einerseits traten Persönlichkeiten in Erscheinung, die sowohl bedeutende Gelehrte als auch erfolgreiche Industrielle waren. Zwei der angesehensten Vertreter einer solchen Personalunion gehörten zum Mitgliederkreis: Werner von Siemens war stiftendes, Ernst Abbé ordentliches Mitglied der DMG. Der beachtliche Zustrom von Lehrern in die Gesellschaft ist daraus zu erklären, dass in dieser Berufsgruppe eine große Anzahl von meteorologischen Beobachtern tätig war. Für das preußische Stationsnetz wurden Lehrer gezielt geworben.

Eine bemerkenswerte Regelung im Organisationsaufbau der Gesellschaft betraf ihre Zweigvereine. Nach § 10 des Statuts konnten Zweigvereine mit einem regional abgegrenzten Wirkungskreis gebildet werden, die jedoch keine territorialen Struktureinheiten der Gesellschaft waren. Damit wurde den bereits in verschiedenen Gebieten Deutschlands bestehenden lokalen bzw. regionalen meteorologischen Organisationen mit teilweise recht beachtlichen Mitgliederzahlen die Integration in die Gesellschaft erleichtert, ohne dass ihre tradierten Strukturen aufgelöst wurden. Angehörige von Zweigvereinen konnten zu ermäßigten Beitragssätzen zugleich Mitglieder der Gesellschaft sein. Die Veranstaltungen der Zweigvereine prägten maßgeblich das wissenschaftliche Leben der Gesellschaft zwischen den Jahrestagungen.

Unmittelbar nach Gründung der DMG wurden bereits bestehende Vereine zu Zweigvereinen umgebildet. Im Januar 1884 konstituierte sich der „Verein für landwirtschaftliche Wetterkunde der Provinz Sachsen und Umgebung" als Zweigverein der DMG und brachte ihr den beachtlichen Zustrom von 64 Mitgliedern. Am 14. Januar 1884 bildete sich der Zweigverein Hamburg-Altona mit 43 Mitgliedern. Damals waren Hamburg und Altona zwei unabhängige Städte. Erst 1939 wurde Altona ein Teil der Stadt Hamburg. Ihm folgte am 29. Januar der Berliner Zweigverein mit 88 und am 13. Februar 1884 der Zweigverein München mit 65 Mitgliedern.

Seit 1884 erschien die „Zeitschrift für Meteorologie" als Organ der Gesellschaft. Um ihre Gründung und Gestaltung erwarb sich W. Köppen große Verdienste. Hinsichtlich der Aktualität, des theoretischen Niveaus und der Praxisnähe der Beiträge konnte sie sich von Anfang an mit den führenden meteorologischen Fachzeitschriften des Auslandes messen. In besonderem Maße orientierte man sich am Journal der österreichischen Partnergesellschaft. *„Die so vortrefflich geleitete und eines so wohlbegründeten Rufes sich erfreuende Zeitschrift der österreichischen Gesellschaft für Meteorologie wird unser vornehmliches Vorbild sein, und wir hegen die Hoffnung, dass nicht nur bloß ein freundschaftliches Zusammenarbeiten zum gemeinsamen Zwecke gesichert sei, sondern sich sogar ein Modus für die Verschmelzung der beiden Zeitschriften nach wenigen Jahren finden lassen werde."* [16]. Das Ziel einer gemeinsamen Fachzeitschrift wurde von den Vorständen und verantwortlichen Redakteuren beider Gesellschaften konsequent verfolgt. Die gemeinsame Zeitschrift erschien durch Beschluss der Mitgliederversammlungen ab 1.1.1886. Sie wurde von J. Hahn (Wien) und W. Köppen (Hamburg) gleichberechtigt und einvernehmlich redigiert. Die Kosten wurden von beiden Gesellschaften anteilig getragen.

Mit der Berliner Haupttagung im April 1889 erreichte die Frühphase der Entwicklung und Formierung der DMG einen gewissen Abschluss. Die Gesellschaft war organisatorisch konsolidiert und hatte ihren festen Platz im wissenschaftlichen Institutionsgefüge gefunden. Berlin hatte den Ruf eines international bedeutenden Zentrums der Meteorologie wiedererlangt und wurde zum Vorort, W. von Bezold zum Vorsitzenden der Gesellschaft gewählt, die nunmehr – weit über den vordergründig sichtbaren Habitus einer regelmäßig tagenden Institution hinaus – ein wichtiges tragendes disziplinäres Integrationszentrum der Meteorologie darstellte.

Literatur

[1] Nachlass Wilhelm Foerster. Nr. 22. Archiv der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften.

[2] G. Neumayer: Bericht über die Verhandlungen des zweiten Internationalen Meteorologenkongresses in Rom 1879. In: Nachlass W. Foerster (siehe [1]).

[3] Denkschrift über die Betheiligung Deutschlands an der Durchführung des durch die Hamburger und Berner internationale Konferenz festgesetzten Planes zur Erforschung der Polar-Regionen. Geheimes Staatsarchiv Preußischer Kulturbesitz (im folgenden GStA PK) Reichsamt des Innern Nr. 14089 I.

[4] Stenographischer Bericht der Sitzung des Reichstages am 14. März 1881. Berlin. Protokollband 1881, S. 333.

[5] Stenographischer Bericht (wie [4]) S. 335.

[6] Zweite Denkschrift über die Betheiligung Deutschlands an der Polarforschung. In: Nachlass Wilhelm Foerster (wie [1]).

[7] Bericht über die Verhandlungen und Beschlüsse einer Konferenz der Vorstände deutscher meteorologischer Zentralstellen. In: Nachlass Friedrich Althoff. GStA PK, Rep.92, A I. Nr.205, Bl. 89.

[8] Protokoll des Reichstages am 13. März 1881. Berlin. Protokollband 1881, S. 613.

[9] Protokoll (wie [8]) S. 610.

[10] Protokoll (wie [8]) S. 613.

[11] Votum des Minister-Präsidenten, betreffend den Wetterbeobachtungsdienst. GStA PK Rep. 151, I C, Nr. 7071, Bl. 130.

[12] R. Aßmann: Die Wetterwarte der „Magdeburgischen Zeitung". In: Zeitschrift der österreichischen Gesellschaft für Meteorologie 16 (1881), S. 381 ff.

[13] Gründung der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft. In: Meteorologische Zeitschrift Jg. 1884, H. 1, S. 38 ff.

[14] Einladung zur Betheiligung an der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft. GStA PK Rep. 76 V C, Sekt. 1, Tit. 11, Teil II, Bl. 6.

[15] Statuten der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft, GStA PK Rep. 76 V C, Sekt. 1, Tit. 11, Teil II, Bl. 6-7.

[16] Vereinsnachrichten. In: Meteorologische Zeitschrift 1 (1884), S. 32.

Anschrift des Autors:

Dr. Oswald Kopatz
Heinrich-Dorrenbach-Straße 15
15334 Strausberg
E-Mail: oswald.kopatz@web.de

promet, Jahrg. 31, Nr. 2–4, 209-210 (Oktober 2005)
© Deutscher Wetterdienst 2005

K. HOFIUS

Die globale Bewertung internationaler Gewässer

The **G**lobal **I**nternational **W**aters **A**ssessment (GIWA)

Die Initiative zur Gründung von GIWA ging von der Globalen Umwelt Einrichtung (**G**lobal **E**nvironmental **F**acility, GEF) und dem Umwelt Programm der Vereinten Nationen (**U**nited **N**ations **E**nvironment **P**rogramme, UNEP) aus. Die Vorbereitungs- und Gründungsphase liegt in den Jahren 1994–1997. GEF bewilligte Ende 1996 Mittel, um ein breit angelegtes Programm zu entwickeln, das eine umfassende und integrierende globale internationale Gewässerbewertung zum Ziel hatte. Hierin sollten Probleme von Süßwassereinzugsgebieten und den mit ihnen zusammenhängenden Küstensystemen hinsichtlich Wasserquantität und -qualität sowie der damit einhergehenden Aspekte der Biodiversität und Besiedlung behandelt werden. 1997 wurden auf zwei Workshops zum einen die kritischen Sachthemen und zum anderen die räumliche Aufteilung in Regionen vorgenommen.

Auf dem ersten Workshop wurden fünf zentrale kritische Sachthemen herausgearbeitet, die in der Bewertung durch 22 Umweltaspekte abgehandelt werden. Die Ergebnisse aus der Bewertungsanalyse sollen GEF helfen, Entwicklungsprojekte auszusuchen.

Der zweite Workshop unterteilte die Erdoberfläche in 66 Regionen. Jede Region besteht aus einem oder mehreren großen Wassereinzugsgebieten sowie den dazugehörigen Küstenregionen. Die tiefen Ozeane sind bei der Betrachtung ausgenommen. In jeder Region wurde ein Ansprechpartner bestimmt, der mit einer regionalen Gruppe zusammenarbeitet. Das regionale Netzwerk umfaßt mittlerweile etwa 2000 Experten. Die regionalen Gruppen arbeiten eng mit der Kernmannschaft in Kalmar, Schweden, wo sich auch das Sekretariat für GIWA befindet, zusammen.

In einer Matrix wurden die 66 Regionen mit den fünf kritischen Sachthemen und den 22 Umweltaspekten in Verbindung gebracht (s. Tab. 1). Dies sollte helfen herauszufinden, wo und welche Probleme besonders dringlich sind. Für die Erarbeitung der GIWA Methodologie spielt diese Matrix eine Schlüsselrolle.

Die GIWA-Methodologie stützt sich auf vier Komponenten:

- *Setzen des räumlichen Maßstabes* (Scaling). Hier werden die hydrologischen Einzugsgebiete und Randmeere festgelegt.
- *Setzen des sachlichen Bezugrahmens* (Scoping). Dieser Rahmen ermöglicht eine umfassende Bewertung des gegenwärtigen Kenntnisstandes bezüglich der Auswirkungen der einzelnen GIWA-Aspekte (sowohl umwelt- als auch sozio-ökonomisch bezogen).

Kritische Sachthemen	*I Mangel an Süßwasser*	*II Verschmutzung*	*III Besiedlung und Modifikation von Arten*	*IV Nicht nachhaltige Ausbeute von Fischen und anderen Lebewesen*	*V Globale Änderung*
Umweltaspekte	1.Modifikation der Abflüsse 2. Verschmutzung bei vorhandener Wasserversorgung 3. Änderungen der Wasserstände	4. Mikrobielle Verschmutzung 5. Eutrophierung 6. Chemische Verschmutzung 7. Schwebstoffe 8. Feste Abfälle 9. Thermische Belastung 10. Belastung durch Radioaktivität 11. Abspülungen	12. Verlust von Ökosystemen 13. Modifikation von Ökosystemen oder Ökotonen einschließlich Artenzusammensetzung	14. Übernutzung 15. Unangemessene Fangmethoden 16. Zerstörerische Fischfangpraktiken 17. Abnahme der Bestände durch Verschmutzung und Krankheit 18. Einfluss auf biologische und genetische Diversität	19. Änderungen des hydrologischen Kreislaufs 20. Meeresspiegeländerung 21. Verstärkte UV-Strahlung durch Abnahme der Ozonschicht 22. Änderung der Quellen- und Senkenfunktion von CO_2 in Ozeanen

Tab. 1: Vordefinierte kritische Sachthemen und Bewertungsaspekte von GIWA.

Er informiert über die augenblicklichen Trends sowie die zukünftige Entwicklung. Scoping ist ein Versuch, den Grad der Auswirkungen der 22 GIWA-Umweltaspekte auf einer globalen Vergleichsbasis festzustellen. Dies ist für die Aufstellung von Prioritäten von Bedeutung.

- Analyse der Verursachungsketten (causal chain analysis, CCA). Hiermit sollen die Grundursachen der kritischen Sachthemen gefunden werden, damit ihnen durch politische Maßnahmen wie Abminderung oder Vermeidung der Schadenswirkung begegnet werden kann. So ist GIWA stark Politik orientiert.
- Analyse der politischen Option. Hier werden mögliche Management Interventionen untersucht.

Die Aufstellung der GIWA-Methodologie bereitete einige Schwierigkeiten. Wie sollte beispielsweise Verschmutzung oder Überfischung, Abnahme von Biodiversität oder Mangel an Süßwasser in einer einheitlichen Form im Amazonas-Einzugsgebiet oder im Barentsmeer behandelt werden? Folglich mussten auf globaler Basis anerkannte Kriterien der Umwelteinflüsse und deren sozioökonomischen Auswirkungen entwickelt werden.

Die GIWA-Ergebnisse werden in einer Serie von regionalen Berichten dargestellt. Hier werden die grenzüberschreitenden Gewässer hinsichtlich fünf wichtiger Aspekte beleuchtet: Mangel an Süßwasser, Überfischung, Verschmutzung, Besiedlungsabnahme und globale Klimaänderung. Diese Aspekte werden für jede Region abgehandelt. Mittels der Berichte sollen zukünftige Entwicklungen vorhergesagt und politische Optionen diskutiert werden, um aufzuzeigen, wie nachhaltige Bewirtschaftung durchgeführt werden kann.

Die Bewertungsergebnisse von GIWA werden in erster Linie von GEF und anderen internationalen Finanzierungsorganisationen genutzt. Aber auch nationale Regierungen und regionale Organisationen sollen die regionalen Berichte nutzen. Für manche Entwicklungsregionen oder Länder in einer wirtschaftlichen Übergangsform (z.B. ehem. Ostblockstaaten) stellen sie häufig erstmalig umfassende Ergebnisse zusammen.

Die Laufzeit von GIWA ist sehr begrenzt. Schon Ende 2004 ist es formal beendet worden. Weiter gehende Informationen über GIWA stehen in:
http://www.giwa.net/giwafact/giwa_in_brief_de.phtml.

Literatur

HEMPEL, G., D. DALER, 2004: Why a global International Waters Assessment (GIWA)? *AMBIO* **33(1-2)**, 2-6.

BELAUSTEGUIGOITIA, J. C., 2004: Causual Chain Analysis and Root Causes: The GIWA Approach, *AMBIO* **33(1-2)**, 7-12.

Anschrift des Autors:

Prof. Dr. Karl Hofius
Kastanienstraße 23
56154 Boppard
E-Mail: Hofius@t-online.de

promet, Jahrg. 31, Nr. 2–4, 211-212 (Oktober 2005)
© Deutscher Wetterdienst 2005

Buchbesprechungen

KROMB-KOLB, H.; FORMAYER, H.: Schwarzbuch Klimawandel. Wie viel Zeit bleibt uns noch? ecowin Verlag der TopAkademie GmbH, Salzburg, 2005. 224 S., 61 Abb., meist farbig. ISBN 3-902404-14-0, Preis 19,90 €.

Das Klima, insbesondere das Problem des anthropogenen Klimawandels, ist nicht nur aus wissenschaftlicher Sicht ein intensiv bearbeitetes Forschungsthema (vgl. z. B. DEKLIM, Deutsches Klimaforschungsprogramm, http://www.deklim.de; das UN **I**ntergovernmental **P**anel on **C**limate **C**hange, IPCC, bereitet zur Zeit den vierten Sachstandsbericht vor), sondern findet auch in der Öffentlichkeit viel Beachtung. Allerdings verläuft die öffentliche Diskussion keineswegs immer in sachgerechten Bahnen, sondern schießt einerseits mit der „Klimakatastrophe" über das Ziel hinaus und versucht auf der anderen Seite durch überzogene Skepsis zu verunsichern. Dieser Skepsis sind u. a. auch die Meteorologischen Gesellschaften Deutschlands, Österreichs und der Schweiz entgegengetreten (http://www.dmg-ev.de/gesellschaft/aktivitaeten/pdf/klimastatement_2003.pdf); das Umweltbundesamt bietet eine Homepage mit entsprechenden Fragen und Antworten (http://www.umweltbundesamt.de/klimaschutz/faq.htm). Auch eine ganze Reihe von Persönlichkeiten aus der Klimaforschung engagiert sich in dieser Richtung, was sich auch in mehreren populärwissenschaftlichen Büchern niedergeschlagen hat (z. B. LATIF, M.: Klima. S. Fischer Taschenbuch Verlag, Frankfurt a.M.).

Nun haben sich zwei Meteorologen von der Universität für Bodenkultur in Wien zusammengetan, um mit einem ebenso engagierten wie informativen Taschenbuch, das sich an die interessierte, aber wissenschaftlich nicht bzw. nur wenig vorgebildete Öffentlichkeit wendet, wiederum dieses Ziel zu verfolgen. Über 17 Kapitel spannt sich der Bogen von den Beobachtungsdaten der global gemittelten bodennahen Lufttemperatur über Zukunftsszenarien, Auswirkungen, regionale Aspekte, Argumente der „Klimaskeptiker" bis hin zu Problemlösungen, insbesondere was die Energienutzung, die Herausforderung an die Politik und mögliche Beiträge von jedem einzelnen von uns betrifft. Dass bei den regionalen Aspekten immer wieder mal Österreich im Blickpunkt steht, ist nahe liegend.

Die Thematik ist in Text und Abbildungen sachgerecht, ansprechend und überzeugend gestaltet. Gelegentliche Wiederholungen schaden nicht. Aber teilweise darauf zu verzichten und dafür alle neu auftauchenden Begriffe gleich zu erklären, würde den Wert des Buchs noch steigern. So ist auf S. 42 die NAO erwähnt, dazu aber nur gesagt, dass sie mit der „Wetterküche Europas" zusammenhängt. Auf S. 65 sind die SRES-Emissionsszenarien erwähnt; hier könnte man entweder auf die Abkürzung „SRES" verzichten oder kurz sagen, was diese Abkürzung bedeutet (**S**pecial **R**eport on **E**mission **S**cenarios des IPCC) und wie viele derartiger Szenarien es gibt. Bei der „Treibhauswirksamkeit" (S. 149; fachlich Treibhauspotenzial) wäre das ergänzende Wörtchen „molekular" angebracht, weil der Laie sonst Fehlschlüssen unterliegen könnte.

Auf S. 60 könnte erwähnt werden, dass es neben der nahe liegenden Vermutung, dass eine Erhöhung der Meeresoberflächentemperatur „die Voraussetzungen für die Entstehung tropischer Wirbelstürme... verbessert", auch den in einigen Modellrechnungen auftauchenden Effekt der Stabilisierung der Troposphäre gibt, weil im Zusammenhang mit der tropischen Konvektion die hauptsächliche Erwärmung nicht bodennah, sondern eher in höheren Schichten auftritt; und dies wirkt der Entstehung tropischer Wirbelstürme entgegen. Gerade in der Öffentlichkeitsarbeit ist es wichtig, auch solche Unsicherheiten zu betonen. Schließlich müsste an einigen wenigen Stellen das paläoklimatologische Vokabular überprüft werden. So ist auf S. 77 nicht ein „Eiszeitalter", sondern die Würm-Kaltzeit („Eiszeit") und auf S. 88 nicht eine „Warmzeit", in der wir ja leben (Holozän, Postglazial), gemeint, sondern ein Warmklima ohne Eisvorkommen an der Erdoberfläche, das in der Fachsprache akryogenes Warmklima heißt.

Solche kleineren, den Gesamtwert des Buchs letztlich nicht wesentlich schmälernden Details fallen freilich nur der Fachwelt auf. Daher kann dieses Büchlein auch in der gegenwärtigen Form allen Laien empfohlen werden, insbesondere denjenigen, die für überzogene Klimaskepsis anfällig bzw. verunsichert sind und gerne wissen möchten, was aus fachlicher Sicht nun wirklich Sache ist, wie ernst wir den Problemkreis anthropogener Klimawandel nehmen sollten und welcher Handlungsbedarf sich daraus ergibt.

Christian-D. Schönwiese,
Frankfurt a.M.

STEININGER, K. W., STEINREIBER, C., RITZ, C.: Extreme Wetterereignisse und ihre wirtschaftlichen Folgen, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2005, 246 S., 26 Abb., ISBN 3-540-23477-2, 89,95 €, 142,50 sFr.

Extreme Wetterereignisse und ihre wirtschaftlichen Folgen sind als Thema zur Zeit hochaktuell, da man ja erwartet, dass im Rahmen der zu beobachtenden und zu erwartenden Klimaänderungen die Extreme zunehmen werden. Diesem aktuellen Trend wollten die Herausgeber Rechnung tragen und haben insgesamt 13 Wissenschaftler der verschiedensten Fachdisziplinen gebeten, die Problematik von ihrem jeweiligen Standpunkt aus zu betrachten. Dass bei einem so breiten Spektrum an Fachdisziplinen es jeweils nur zu einer fachspezifischen Übersicht reicht, liegt auf der Hand. Diese Übersichten werden auf etwas mehr als 200 Seiten dargeboten, beginnend mit einem Grundlagenteil, in dem extreme Wetterereignisse charakterisiert und deren Auswirkungen auf Österreich abgehandelt werden. Außerdem wird über die wirtschaftlichen Folgen solcher Ereignisse, das notwendige Risikomanagement sowie Risikotransfermechanismen eingegangen. Abgeschlossen wird der Teil mit einem Kapitel über den Dialog Wirtschaft – Forschung – Politik (Kapitel 8), allerdings bezogen auf die Schweiz und daher nur bedingt zu verallgemeinern. Es ist schade, dass die wichtigen Kapitel (2 u. 3), die den meteorologischen Zugang zum Thema darstellen, nicht dem heutigen Kenntnisstand entsprechen. Hier wird „Mittelwertklimatologie", wie vor 30–40 Jahren aktuell, betrieben. Auf die Problematik der Instationarität des Klimas wird nicht eingegangen und die Klimamodellentwicklung ist wesentlich weiter als dargestellt. Außerdem fallen dem Leser viele Ungenauigkeiten auf, wie zum Beispiel die Behauptung, dass konvektive und advektive Niederschläge extreme Niederschläge seien oder dass ein Tropentag mit einem Maximum der Lufttemperatur = 30 °C definiert ist (richtig: Minimum = 20 °C). Dagegen fällt die wirtschaftliche Analyse extremer Wetterereignisse im Kapitel 4 knapp und übersichtlich aus. Gleiches gilt für die leicht verständliche Darstellung der Risikotransfermechanismen in Kapitel 6 und 7, wohingegen die Ausführungen zum Risikomanagement (Kapitel 5) als zu allgemein gehalten erscheinen.

Im zweiten Teil des Buches werden wichtige Fragen des Risikomanagements aufgegriffen. Das 9. Kapitel behandelt den Zusammenhang zwischen Tourismus und Naturgefahren, wobei in den Unterabschnitten kurz auf die Wirkungen von Hochwasser, Muren, Lawinen, Hagel, Stürmen und Trockenheit eingegangen wird, allerdings wieder nur auf die Schweiz bezogen und somit auch bezüglich der Strategieempfehlungen nur bedingt auf andere Regionen übertragbar. Im 10. Kapitel werden die gleichen Witterungsextreme, diesmal aus dem Blickwinkel des Österreichischen Roten Kreuzes behandelt mit dem Schwerpunkt Katastrophenschutz. Die Auswirkungen von Extremen auf Land- und Forstwirtschaft werden in Kapitel 11 diskutiert. Leider erschöpfen sich die Angaben zu zukünftigen Strategien neben der Mahnung zur Einhaltung des Kyoto-Protokolls auf die Notwendigkeit einer staatlichen Förderung der Land- und Forstwirtschaft. Ausführungen zu versicherungstechnischen Problemen sowie zur Absicherung der Energie- und Wasserversorgung in Österreich schließen den 2. Teil ab (Kapitel 12 u. 13).

Im dritten und abschließenden Teil werden die Schlussfolgerungen aus dem vorher dargestellten gezogen. Dabei ist das 15. Kapitel von besonderem Interesse (Das 14. fasst die nur noch mal die wirtschaftssektoralen Analysen zusammen.), weil hier eine kurze und knappe Übersicht über den noch vorhandenen Forschungsbedarf gegeben wird. Dabei ist die Diskussion der Unsicherheiten von besonderer Bedeutung.

Insgesamt gibt das Buch eine kurze, wenn auch beschränkte Übersicht über den derzeitigen Wissensstand zum Zusammenhang zwischen extremen Wetterereignissen und den daraus resultierenden wirtschaftlichen Folgen.

F.-W. Gerstengarbe, Potsdam

MÜNCHENER RÜCK (Hrsg.): Wetterkatastrophen und Klimawandel. Sind wir noch zu retten? pg Verlag München, 2005, 264 S., zahlr. Abb. ISBN 3-937624-80-5, Preis: 29,90 €.

Im Jahr 1974 begann der Meteorologe Dr. Gerhard Berz, der übrigens vorher seine Referendarausbildung beim Deutschen Wetterdienst erfolgreich absolvierte, seine Tätigkeit bei der Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft (kurz Münchener Rück genannt), nämlich die Erfassung der Auswirkungen von Naturkatastrophen einschließlich gefährlicher Wetterereignisse auf die Versicherungswirtschaft. Während der vergangenen 30 Jahre entstand unter seiner Leitung der Fachbereich „GeoRisikoForschung“ mit nunmehr 25 Mitarbeitern. Kürzlich wurde Dr. Berz, in der Öffentlichkeit auch als „Master of Disaster“ bekannt, in den Ruhestand verabschiedet. Die Münchener Rück gab aus diesem Anlass das vorliegende Buch heraus.

Das Ziel dieses Werkes nach Angaben der Herausgeber war es, ein neues populärwissenschaftliches Standardwerk zum Thema Klimawandel vorzulegen, das aber im Gegensatz zu anderen Büchern zu diesem Thema nicht nur den Stand der Klimaforschung mit den Ursachen, Prozessen und Folgen einer Klimaänderung wiedergeben, sondern auch speziell die Auswirkungen auf die Versicherungswirtschaft mit einschließen soll. Es richtet sich in erster Linie an die Kunden der Münchener Rück, ist aber sicherlich auch für einen größeren Leserkreis konzipiert worden.

Das Buch gliedert sich in vier Bereiche: Stand der Wissenschaft (Klimaforschung), Auswirkungen auf Natur, Mensch und Ökonomie, Handlungsoptionen für Politik und Gesellschaft sowie Chancen und Risiken für die Assekuranz. Bereits im Vorwort wird besonders die Vielfalt der Themen als besonderes Merkmal des Werkes herausgestellt, und in der Tat umfasst es eine Fülle von Beiträgen zu verschiedenartigen Einzelthemen. Die Beiträge wurden von insgesamt 22 renommierten Experten geschrieben, fast ausschließlich aus Deutschland und größtenteils aus der Wissenschaft kommend.

Der erste Bereich (Stand der Wissenschaft) führt in die grundlegenden Ergebnisse der Klimaforschung ein. Behandelt werden Einflussfaktoren auf das Klima (neben dem anthropogenen Treibhauseffekt auch Vulkanismus, solare Aktivität, Aerosole, Landnutzungsänderungen, und auf längerer Zeitskala auch astronomische Einflüsse), historische Klimaaufzeichnungen (Witterungsbeschreibungen aus früheren Jahrhunderten und daraus abgeleitete Indizes), Klimaänderungen basierend auf direkten Messungen seit dem 19. Jahrhundert, El Niño/Southern Oscillation, thermohaline Zirkulation, Satellitenfernerkundung, Klimamodellierung, abrupte Klimawechsel (Dansgaard-Oeschger-Ereignisse). Am Ende dieses Abschnitts wird auch auf die Einwände der Klimaskeptiker eingegangen, außerdem auf ganz konkrete fehlerhafte Medienveröffentlichungen wie z.B. eine fehlerhafte Grafik in einem Artikel in „Der Spiegel“, der sich mit dem Zusammenhang zwischen Temperatur und Sonnenaktivität befasste, sich dabei auf diese falsche Grafik bezog und damit zu falschen Schlussfolgerungen kam. Damit wird demonstriert, dass insbesondere derartige Medienberichte durchaus kritisch gelesen werden sollten.

Im zweiten Teil geht es dann um die Auswirkungen des Klimawandels. Dazu gehören die Zunahme an Naturkatastrophen, Hochwasser, Gletscherrückgänge, Stürme, Verschiebung phänologischer Pflanzenphasen, Hitzebelastung, Ausbreitung von Krankheiten. Auch hier wird jeweils immer die wissenschaftliche Absicherung angesprochen, d.h. auf welcher Grundlage (Modellrechnung, Zeitreihe etc.) die Ergebnisse beruhen.

Der dritte Abschnitt hat die politischen Reaktionen auf den Klimawandel zum Thema. Als wesentliche Themen stehen hier im Vordergrund: Das Kioto-Protokoll, die Rolle des Energiemarktes und der Umweltorganisationen, Emissionshandel innerhalb der EU.

Das vierte Kapitel schließlich betrifft die Chancen und Risiken für die Versicherungswirtschaft, insbesondere wie groß die Schadenrelevanz der Klimaänderung und von Wetterkatastrophen ist. Neben Dr. Berz selbst und weiteren Mitarbeitern der Münchener Rück kommt auch ein Vertreter der britischen Versicherungsgesellschaft zu Wort. Es wird aufgezeigt, z. B. bei welchen Naturereignissen welche Risiken drohen oder wie sich der Einsatz bestimmter Energieformen verändern wird.

Die beitragenden Autorinnen und Autoren haben sich alle weitgehend erfolgreich um eine sehr klare und prägnante, aber dennoch wissenschaftlich exakte Darstellung bemüht und die wesentlichen Punkte ihres jeweiligen Themas angesprochen. Dennoch lässt es sich natürlich bei den vielen Themen nicht vermeiden, dass die einzelnen Beiträge notgedrungen relativ kurz ausfallen (meist 6–10, maximal 12 Seiten pro Beitrag), so dass nicht zu sehr in die Tiefe gegangen werden kann. So können z. B. nicht alle Aspekte der Satellitenklimatologie und der Klimamodellierung angesprochen werden. Nicht enthalten z. B. ist ein umfassender Überblick über die bereits existierenden Satellitenklimadatensätze oder über die Palette der existierenden regionalen Klimavorhersagen. Einige Themen, die durchaus Relevanz für die Versicherungswirtschaft haben, fehlen auch völlig, z. B. witterungsklimatologische Ergebnisse wie die Verschiebung von Jahreszeiten oder die Häufigkeit von Wetterlagen, manches wird nur am Rande abgehandelt und hätte einen eigenen Beitrag verdient, z. B. das Auftreten von Tornados in Europa. Zusätzliche Beiträge vom Deutschen Wetterdienst wären sicherlich noch möglich gewesen, sind aber leider nur ganz vereinzelt in Form von grafischen Darstellungen zu finden. Andererseits muss man jedoch den Herausgebern zugestehen, dass die Themenauswahl ansonsten relativ ausgewogen ist und bei einer solchen Themenvielfalt kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben werden kann.

Bemerkenswert an dieser Zusammenstellung ist, dass vielleicht entgegen mancher Erwartungen die Thematik der meteorologisch bedingten Versicherungsschäden eigentlich gar nicht im Vordergrund steht, sondern nur als eine von vielen Fragen im Bereich Klimawandel eingeordnet wird. Andere Unternehmen hätten wahrscheinlich die Gelegenheit eines solchen Personalwechsels noch mehr zu einer umfassenden Selbstdarstellung ihrer eigenen Arbeit genutzt oder zumindest eine entsprechende Schwerpunktbildung vorgenommen. Die Münchener Rück hat diesen Weg anscheinend bewusst nicht gewählt, sondern hat offenbar mehr Wert darauf gelegt, als Bindeglied einer langen Ursache-Wirkungskette und als Partner von Wissenschaft und Politik zu erscheinen, anstatt ihre eigenen Beiträge in den Vordergrund zu stellen. Formal ist an diesem Buch kaum etwas zu bemängeln; auffallend war an manchen Stellen die sehr unterschiedliche Anzahl von zitierten Literaturstellen, am Ende des Buches sucht man leider vergeblich nach einem Stichwortverzeichnis. Die Aufmachung des Buches mit vielen bunten Fotos und grafischen Darstellungen wirkt insgesamt sehr ansprechend, die Sprache ist keineswegs so reißerisch, wie man vom vielleicht nicht so ganz passenden Titel her („Sind wir noch zu retten“) vermuten würde.

Zusammenfassend kann man sagen, dass es sich bei diesem Buch um eine kompakte, aber inhaltlich im Wesentlichen gelungene Darstellung handelt. Zwar ersetzt es kein Klimatologie-Lehrbuch und wer eher spannende Berichte über Versicherungsschäden statt einer nüchternen wissenschaftlichen Darstellung erwartet hat, wird sicherlich etwas enttäuscht sein, aber wer eine große und dennoch überschaubare Bandbreite zu diesem Themenkomplex in einem Band zusammengefasst haben möchte, wird dieses Buch wahrscheinlich gerne benutzen. Es ist im freien Buchhandel erhältlich, übrigens existiert auch eine englischsprachige Version dieses Werkes.

Der Rezensent möchte an dieser Stelle, auch im Namen des Deutschen Wetterdienstes, Herrn Dr. Berz zu seinem großen Engagement in der Meteorologie gratulieren und ihm einen frohen Ruhestand wünschen, außerdem seinem Nachfolger, Herrn Prof. Dr. Dr. Höppe und allen seinen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern viel Erfolg für die Zukunft!

P. Bissolli, Offenbach

© Deutscher Wetterdienst 2005

Habilitationen, Promotionen sowie Diplomhaupt- und Masterprüfungen im Jahr 2004

Universität Bayreuth

Promotion

WRZESINSKY, Thomas: Direkte Messung und Bewertung des nebelgebundenen Eintrags von Wasser und Spurenstoffen in ein montanes Waldökosystem.

Diplom-Hauptprüfung

SEIFERT, Willi: Klimaänderung und (Winter-)Tourismus im Fichtelgebirge: Auswirkungen, Wahrnehmung und Ansatzpunkte zukünftiger touristischer Entwicklung.

Freie Universität Berlin

Promotionen

ALBERT, Peter: Remote sensing of atmospheric water vapour for numerical weather prediction.

SCHRÖDER, Marc: Multiple scattering and absorption of solar radiation in the presence of three-dimensional cloud fields.

Diplom-Hauptprüfungen

JAHN, Alexandra: Atmosphären-Vegetations-Wechselwirkung im Klimasystem des letzten Glazials.

LEINWEBER, Ronny: Fernerkundung atmosphärischen Wasserdampfes für einen Vergleich mit dem regionalen Klimamodell REMO.

LINDSTROT, Rasmus: Validierung der Wolkenhöhe aus MERIS-Daten mit flugzeuggestützten LIDAR-Messungen.

NEISSNER, Felix: Über die Erfassung von Grenzschichtstrukturen in Berlin anhand von LIDAR-Messungen (Messprojekt HoVerT 2001-2002).

DEBRECHT, Jana: Validierung passiver Fernerkundungsverfahren zur Erkennung von Wolken.

PRÖMMEL, Kerstin: Simulation der Schneebedeckung am Ende des Eems mit einem 3-dimensional gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Modell.

WEBER, Nadine: Messung von Temperaturverläufen verschiedener Oberflächen mit Hilfe einer Thermalbildkamera an einer Reihe von ausstrahlungsintensiven Tagen und Nächten in der Berliner Innenstadt und im nahegelegenen Berliner Umland im Jahr 2002.

Universität Bonn

Promotion

HEUEL, Eva-Maria: Quantitative Niederschlagsbestimmung aus Radardaten: ein Vergleich von unterschiedlichen Verfahren unter Einbeziehung der Statistischen Objektiven Analyse.

Diplom-Hauptprüfungen

DIEDERICH, Malte: Measuring small scale inhomogeneity of rain with combined vertically pointing radars.

GIRMES, Robin: Saisonale Niederschlagsvorhersage in den niederen Breiten auf der Basis von Model Output Statistics (MOS).

SCHOLTEN, Anja: Modellübergreifende Klimaänderungssignale in den niederen Breiten: El Niño - Southern Oszillation und Monsune.

SIMON, Jürgen Lorenz: Tracking of Radar-Detected Precipitation-Centroids using Scale-Space Methods for Automatic Focussing the SARTrE Algorithm.

SMOYDZIN, Linda: Theoretische und numerische Untersuchungen zur Konvektionsparametrisierung in einem Wettervorhersagemodell.

STALLMACH, Julia: Untersuchung von Starkregenereignissen anhand von Regenwippen- und Radardaten im Raum Bonn/Köln.

Universität Bremen

Habilitation

BÜHLER, Stefan: Remote Sensing of Atmospheric Composition for Climate Applications.

Promotionen

DANNENBERG, Jens: Ableitung der Topografie des Wattenmeeres aus ERS-SAR Daten.

GANG, Hong: Effects of storms on microwave brightness temperatures and its application to estimate cloud parameters from AMSU-B.

LAUE, Hendrik: Automated Detection of Canola/Rapeseed Cultivation from Space.

Universität Dresden

Diplom-Hauptprüfungen

JATHO, Adine: Niederschlagsbestimmung mit Hilfe von zeitlich hochaufgelösten Meteosat-Daten.

SPANK, Uwe: Bestimmung trockener Konvektion mit Hilfe von MSG (Meteosat-Second-Generation) - Daten.

Universität Frankfurt am Main

Habilitation

KOPPMANN, Ralf: Untersuchungen zur Emission flüchtiger organischer Verbindungen aus Biomasseverbrennung.

Promotionen

HAASE, Hans-Peter: Zur Variabilität der Dynamik in der Stratosphäre – Eine Untersuchung auf der Grundlage der Varianz von chemischen Tracern.

TILMES, Simone: Bestimmung des chemischen Ozonverlustes in der arktischen Stratosphäre aus Satellitenmessungen.

Diplom-Hauptprüfungen

BUCHHOLZ, Ute: Wasserstoff- und Kohlenmonoxidmessung auf dem Kleinen Feldberg im Sommer 2002.

JONAS, Martin: Zeitlich gleitende extremwertstatistische Untersuchung von monatlichen Temperatur- und Niederschlagsreihen in Deutschland.

KLEIN, Holger: Untersuchungen zur Homogenität des arktischen stratosphärischen Polarwirbels auf Grundlage von meteorologischen Daten und Messungen luftchemischer Tracer.

Universität Freiburg

Promotionen

PECK, Anja Kathrin: Hydrometeorologische und mikroklimatische Kennzeichen Buchenwäldern.

SCHINDLER, Dirk: Characteristics of the atmospheric boundary layer over a Scots pine forest .

ROST, Jutta: Vergleichende Analyse der Energiebilanz zweier Untersuchungsflächen der Landnutzungen „Grasland“ und „Wald“ in der südlichen Oberrheinebene.

DOSTAL, Paul: Klimarekonstruktion der Regio TriRhena mit Hilfe von direkten und indirekten Daten vor der Instrumentenbeobachtung.

HOLST, Thomas: Einfluss von Exposition und Bestandesdichte auf das Mikroklima in Buchenwäldern.

Diplom-Hauptprüfung

TÜRK, Matthias: Jahresbilanz des turbulenten CO_2-Flusses über dem Hartheimer Kiefernwald.

Universität Hamburg

Promotionen

BAQUERO-BERNAL, Astrid: Interannual Climate Variability in the Tropical Indian Ocean: A Study with a Hierarchy of Coupled General Circulation Models.

SIEVERS, Oliver: Bestimmung von strahlungsbedingten, atmosphärischen Erwärmungsraten aus MSG-Daten.

SCHANZ, Lars-Christian: Fernerkundung warmen Regens mit dem Satelliten der „Tropical Rainfall. Measuring Mission" (TRMM).

STENZEL, Oliver: Dynamische und thermodynamische Einflüsse auf den Drehimpuls der Atmosphäre und dessen Auswirkung auf die allgemeine Zirkulation.

WUNRAM, Claudia: Satellitenfernerkundung des Emissionsvermögens von Landoberflächen im Mikrowellenbereich.

Diplom-Hauptprüfungen

BELLAIRE, Sascha: Verifikation des Stabilitätsmoduls des Schneedeckenmodels SNOWPACK.

GÜNNEWIG, Petra: Die atmosphärische Grenzschicht in LIDAR-Messungen und REMO-Simulationen.

KÜHRIG, Britta: Grundlagenuntersuchungen zum Luftschadstoffeintrag in Gebäude.

PAULMANN, Antje: Experimentelle Untersuchungen zur Grenzschichtentwicklung auf Bauwerken.

POEPPEL, Paula: Simulation der 3-dim. Struktur der Wolken am Beispiel des BBC-Feldexperimentes.

SCHRÖDER, Guido: Anwendung von TVD- und ENO-Verfahren für die Simulation Mesoskaliger Dichteströmungen.

STANELLA, Tanja: Der Zusammenhang zwischen ENSO und der terrestrischen Kohlenstoffbilanz unter besonderer Berücksichtigung des Pinatubo-Ausbruchs.

STRITZKE, Ramona: Kräftige Regenschauer – Sind sie Mini-Hochs?

Universität Hannover

Diplom-Hauptprüfungen

RÖHNER, Peer: Meteorologische Analyse des Wettereinflusses auf den Flugbetrieb im Winter.

ROSCZYK, Sonja: Evaluation of the Advanced Diagnosis and Warning system for Icing Environments (ADWICE) - Methodological Aspects.

Universität (TH) Karlsruhe

Promotionen

BLAHAK, Ulrich: Analyse des Extinktionseffektes bei Niederschlagsmessungen mit einem C-Band Radar anhand von Simulation und Messung.

DASH, Prasanjit: Land surface temperature and emissivity retrieval from satellite Measurements.

GRIESFELLER, Alexandra: Validierung von ENVISAT-Daten mit Hilfe von bodengebundenen FTIR-Messungen.

LENGEL, Anton: Bestimmung der Apparatefunktion des Fourierspektrometers MIPAS-B2 aus stratosphärischen Spektren.

TSIDU MENGISTU, Gizaw: The Role of Chemistry and Transport on NO_y Partitioning and Budget during Austral Spring 2002 as derived from MIPAS Measurements.

WIESER, Andreas: Messung turbulenter Spurengasflüsse vom Flugzeug aus.

Diplom-Hauptprüfungen

EISENMANN, Mark: Güte quantitativer Niederschlagsvorhersagen mit dem Lokal-Modell unter konvektiven Bedingungen.

GRIESFELLER, Jan: Untersuchung von Starkniederschlägen mittels Radar.

HOOSE, Corinna: Numerische Simulation zur Ausbreitung von Mineralstaub auf der regionalen Skala.

KIRNER, Oliver: Bewertung und Validierung einer mehrjährigen KASIMA-Simulation durchgeführt mit ERA-40 Reanalysen.

KOCH, Christian: Klassifikation von Wolken durch Struktur- und Kontextanalyse .

MEISSNER, Cathérine: Modellierung der Konvektionsentwicklung unter Einfluss unterschiedlicher Oberflächeneigenschaften.

SASSE, Rüdiger: Beziehung zwischen Niederschlag und synoptisch-skaligen Prozessen im östlichen Mittelmeergebiet.

STELLER, Heike: Analyse und Simulation des orografisch bedingten Niederschlags über Mittelgebirgen.

Universität Köln

Promotionen

REINER, Peggy M. : Einfluss der Vertikalverteilung des Wasserdampfes auf den Lebenszyklus intrasaisonaler Konvektionsschwankungen über dem tropischen Indopazifik.

SENTUC, Florence-Nathalie: Der Einfluss lokaler Verkehrsemissionen auf die Immissions-Situation im Großraum Köln.

SPANGEHL, Thomas: Katabatische Winde über der Antarktis und die südliche Zirkulation.

Diplom-Hauptprüfungen

DASCOULIDOU-HEIBEY, Eugenia: Die Einteilung Benins und Nigerias in Regionen typischen monsunalen Niederschlagsregimen und deren Veränderungen zwischen den Klimanormalperioden 1931–1960 und 1961–1990.

ERMERT, Volker: Typisierung von Niederschlagsereignissen in der westafrikanischen Sudanzone während des Sommermonsuns 2002.

KANTUZER, Josef: Niederschlag in Nordrhein-Westfalen in Abhängigkeit der Verweildauern und der Abfolgen von Großwetterlagen.

KELLER, Jan: Modellstudien zu Wechselwirkungen zwischen Oberfläche und Atmosphäre während Trockenepisoden in der westafrikanischen Regenzeit.

POHLE, Susan: Auslösung von mesoskaligen Gewitterkomplexen über Westafrika im Zusammenhang mit Trögen in den oberen Westwinden außerhalb der Regenzeit.

REITTER, Béla: Europaweite Windstromvorhersage auf Basis eines numerischen Vorhersagemodells.

TRIPPLER, Simon: Variabilität kontinentalskaliger katabatischer Massenflüsse aus der Antarktis und die großskalige atmosphärische Zirkulation.

Universität Leipzig

Promotionen

FAULWETTER, Robin: Zur Anwendbarkeit des Fluktuations-Dissipations-Theorems.

HEINRICH, Harald: Finite barotrope Instabilität unter synoptischem Antrieb.

MANJARREZ, Maria: Zusammenhang zwischen den Anzahlkonzentrationen von Indoor- und Outdoor-Partikeln in Abhängigkeit von meteorologischen und physikalischen Parametern.

UHRNER, Ulrich: New Particle Formation and Growth in the Lower Troposphere: A Comparison of Model Results with Observations at a Continental Background Site.

Diplom-Hauptprüfungen

BALOGH, Kati: Untersuchung der gekoppelten Einflüsse von Boden und Meteorologie auf die Schallausbreitungen in der Atmosphäre mittels des Schallstrahlenmodells SMART.

DANIEL, Danny: Validierung des Verfahrens der akustischen Laufzeittomografie durch den Vergleich mit konventionellen in situ Messungen.

DIELEFELD, Sabine: Untersuchung von Wasserdampfmessungen mit einem Raman-Lidar.

HEINOLD, Bernd: Charakterisierung der Gebirgsüberströmung bei aufliegender Bewölkung am Thüringer Wald.

KÖNIG, Korinna: Erzeugung und Charakterisierung von unbeschichteten und beschichteten Rußpartikeln zur Anwendung als Kondensationskeim in einem Wolkenströmungsrohr

NEUBERT, Anja: Meteorologische Beiträge zur optimierten Betriebsführung von Windparks.

RINKE, Raik: Die Entwicklung eines Aktivität basierenden Tropfenwachstumsmodell für den Leipzig Aerosol Cloud Interaction Simulator.

SEBECKER, Jana: Meteorologische Grundlagen und Qualitätskriterien von Windindices.

SONNTAG, André: Vergleich des mobilen radioakustischen Sondierungssystems MODOS mit in-situ-Messverfahren in der atmosphärischen Grenzschicht.

TILGNER, Andreas: Modellrechnung zur Modifikation der physiko-chemischen Eigenschaften des atmosphärischen Aerosols bei orographischen Wolkenereignissen.

WILSDORF, Michael: Untersuchung des äolischen Sedimenttransports mittels Saltifon und Sedimentfallen.

Universität Mainz

Promotionen

TRAUB, Michael: Lagrangian transport evaluation of atmospheric chemistry in the Mediterranean region.

Diplom-Hauptprüfungen

GUTACKER, Helge: Das Wachstum von Tropfen im molekularkinetischen Übergangs- und Kontinuumsbereich.

NILLIUS, Björn: Modifikation eines Expansions-Aerosolkernzählers auf Streulichtmessung und Charakterisierung.

PAULAT, Marcus: Berechnung und Analyse von CAPE für Süddeutschland.

VETTER, Tobias: Berechnung der Mie-Streufunktionen zur Kalibrierung optischer Partikelzähler.

WALTER, Saskia: Simulation der Umströmung eines Teilstromentnahme-Einlaß-Systems für Höhenforschungsflugzeuge.

Meteorologisches Institut der Universität München

Habilitationen

ZÄNGL, Günther: Untersuchung der Dynamik des alpinen Föhns sowie einiger ausgewählter Talwindsysteme mit Hilfe numerischer Simulationen.

WEBER-PHILIPP, Harry: Theoretische und praktische Arbeiten zur Vorhersage tropischer Zyklone.

Promotionen

HAAG, Werner: Zur Initiierung der Eisphase in Zirruswolken: numerische Simulationen von Gefrierprozessen in einer Aerosolkammer und atmosphärische Implikationen.

SPICHTINGER, Peter: Eisübersättigte Regionen.

STEINWAGNER, Jörg: Optimierung der Parameterauswahl für ein operationelles Off-line-retrieval von Spurengas-Vertikalprofilen aus MIPAS-Daten.

Diplom-Hauptprüfungen

LORENZ, Christian: Bestimmung der optischen Dicke von Aerosol im Raum München.

WEINZIERL, Bernadett Barbara: Tropical Convergence Lines.

Technische Universität München

Promotionen

FISTRIC, Sasa: Die Bestimmung der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) für heterogene atmosphärische Bedingungen.

Diplom-Hauptprüfungen

DENGEL, Sigrid: Methoden der Nebelquantifizierung in einem Bergregenwald Südecuadors.

HÜBNER, Silke: The influence of El Niño and other Oscillation Patterns on the Geographical Distribution of Tropical Cyclones and Possible Implications on Insurance.

OBERMEIER, Christian: Vergleich von konventioneller und Radar-Messung zur Erfassung der Niederschlagsverteilung in tropischen Bergregenwäldern Sudecuadors.

Master-Examen

KOHLPAINTNER, Michael: Atmosphärischer Beitrag zur Wasser- und Nährstoffbilanz eines tropischen Bergregenwaldes in Südecuador.

Universität Oldenburg

Diplom-Hauptprüfungen

TAMBKE, Jens: Strömungs-Modellierung der atmosphärischen Grenzschicht über dem Meer zur Windleistungsvorhersage für Offshore-Windparks.

TAUTZ, Saskia: Thermal Effects in the Atmospheric Boundary Layer above the North Sea.

Universität Graz

Diplom-Hauptprüfungen

POCK, Michael: Langwellenstrahlungstransfer in der Atmosphäre und seine Sensitivität zu Änderungen der Wasserdampfkonzentration.

SCHWEITZER, Susanne: Atmosphere and Climate Explorer Mission ACE+: Humidity and Temperature Retrieval Performance Analysis.

TREFFER, Melanie: Melting proves for exploring ice layers on planets and moons.

Universität Innsbruck

Promotionen

VERGEINER, Johannes: South foehn studies and a new foehn classification scheme in the Wipp and Inn valley.

Diplom-Hauptprüfungen

DRAXL, Caroline: Wind energy potential at wind measurement sites in the Tyrolean Alps.

DRECHSEL, Susanne: Objective Forecasting of South Foehn for the Wipp Valley based on ECMWF-T511 Model Data.

HEIDINGER, Markus: Developments for a semi-distributed runoff modelling system and its application in the drainage basin Ötztal.

KRISMER, Andreas: Sonnenscheindauer, Wind und Globalstrahlung im Raum Innsbruck und diesbezügliche Aspekte alternativer Energiegewinnung.

LANG, Josef: Messung und Simulation der Schneedecke im Kühtai im Winter 2002/2003.

MATZI, Elisabeth: Zeitreihen der Dichteentwicklung am Hintereisferner von 1964 bis 2002.

SAMSELNIG, Martin: Untersuchung der Ionenkonzentration im Niederschlag bei unterschiedlichen Strömungslagen im Innsbrucker Raum.

STARKE, Holger: Fallstudien von Hochnebel im Inntal.

Universität Wien

Institut für Meteorologie und Geophysik

Promotionen

BAUMANN-STANZER, Kathrin: Qualitätsprüfung, Verifikation und Anwendung von Windprofilerdaten in Österreich.

HAAS, Patrick: Optimal Forecast Error Covariance Estimation in Numerical Weather Prediction Models.

Diplom-Hauptprüfungen

BRUGGER, Katharina: Bestimmung von Flächenniederschlägen über Zentral- und Nordeuropa aus Wetterradardaten.

EYWO, Florian: Zusammenhang zwischen meteorologischen Parametern und dem Gesamtozon zur Entwicklung einer statistischen Methode der Ozonprognose.

GÖTZL, Gregor: Ein Vergleich geophysikalischer Messergebnisse zu radiästesischen Beobachtungen.

HITSCH, Ulrike: Vergleich von GPS- und Radiosonden-Feuchtewerten.

KNABL, Thomas: Klimatologische Auswertung der VERA-Druckanalysen von 1989 bis 2001.

LICHTENAUER, Silke: Ortsbezogene Hochnebelvorhersage mit Hilfe eines Limited Area Modells.

MAURER, Christian: Statistisches Downscaling von ECMWF-Datensätzen.

POSPICHAL, Bernhard: Struktur und Auflösung von Temperaturinversionen in Dolinen am Beispiel Grünloch.

PUCHEGGER, Martin: Untersuchung konvektiver Phänomene im orographisch gegliederten Gelände unter Zuhilfenahme von Fernerkundungsdaten.

STEINHEIMER, Martin: Grenzschichtkonvektion.

WITTMANN, Christoph: Evaluierung mesoskaliger Niederschlagsprognosen im österreichischen Südalpenraum.

ZEINLINGER, Daniel: Synoptische Klimatologie von Zyklonen im Alpenraum und über dem nördlichen Mittelmeer.

Universität Basel

Promotion

ARCK, Martin: Untersuchungen zur räumlich verteilten Bestimmung des fühlbaren Wärmestroms über Schnee in einem komplexen Gelände.

Diplom-Hauptprüfungen

PFÄNDLER, Sascha: Strahlungsmessungen in einem Straßencanyon während Bubble.

FREY, Corinne: Stadtklimauntersuchung: dfubai, Abu Dhabi (UAE).

ZECHA, Laurent: Der Einfluss der Landnutzung auf die langwellige Emission (NOAA-AVHRR und MODIS).

ETH Zürich

Promotionen

BASCHEK, Björn: Influence of Updrafts and Embedded Convection on the Microphysics of Riming.

DUERR, Bruno: Greenhouse effects in the Alps – by models and observations.

GRIMBACHER, Tobias: Bestimmung und Vorhersage von Bewölkung mit bodennahen Temperaturmessungen.

HEGGLIN, Michaela I.: Airborne NO_y-, NO-, and O_3-measurements during SPURT: Implications for atmospheric transport.

KOCH, Patrick: Novel Perspectives of Jet-Stream Climatologies and Events of Heavy Precipitation on the Alpine Southside.

LI, Yingshi: Concentrations of Ozone and Its Precursors at Arosa and Jungfraujoch and Their Relations to the Regional and Hemispheric Background.

MAEDER, Jörg A.: Haupteinflussfaktoren auf das stratosphärische Ozon in der nördlichen Hemisphäre.

SCHEFOLD, Raphael: Messungen von Schneeflocken. Die Fallgeschwindigkeit und eine Abschätzung weiterer Grössen.

SHEPPARD, Raelene: On the parameterisations of the turbulent fluxes in GCMs.

STOECKLI, Reto: Modeling and observations of seasonal land-surface heat and water exchanges at local and catchment scales over Europe.

Examina früherer Jahre sind in folgenden Heften veröffentlicht:

Heft	*Prüfungsjahrgang*	
meteo 0	1968	
1/2 71	1969	
1/2 71	1970	
2 72	1971	
1 73	1972	
2 74	1973	
2 75	1974	
1 76	1975	
1 77	1976	
2/3 78	1977	
1 79	1978	
1/2 80	1979	
2/3 81	1980	
3/4 82	1981	
1/2 83	1982	
2/3 84	1983	
2/3 85	1984	
2/3 86	1985	1.Teil
4 86	1985	2.Teil
3/4 87	1986	
4 88	1987	
3/4 89	1988	
3/4 90	1989	
3/4 91	1990	1.Teil
1 92	1990	2.Teil
2/3/4 92	1991	
4 93	1992	
1/3 24	1993	
4 24	1994	
1/2 26	1995	
3/4 26	1996	
1/2 27	1997	
3/4 27	1998	
1/2 28	1999	
3/4 28	2000	
1/4 29	2001	
1/2 30	2002	
4 30	2003	

Anschriften der Autoren dieses Heftes

DIPL.-MET. WOLFGANG K. ADAM
Deutscher Wetterdienst
GB Forschung und Entwicklung
Meteorologisches Observatorium Lindenberg
Am Observatorium 12
15848 Tauche/OT Lindenberg
E-Mail: wolfgang-k.adam@dwd.de

PROF. DR. GERHARD ADRIAN
Deutscher Wetterdienst
GB Forschung und Entwicklung
Postfach 10 04 65
63004 Offenbach/Main
E-Mail: gerhard.adrian@dwd.de

PD MAG. DR. FRANZ H. BERGER
Deutscher Wetterdienst
GB Forschung und Entwicklung
Meteorologisches Observatorium Lindenberg
Am Observatorium 12
15848 Tauche/OT Lindenberg
E-Mail: franz.berger@dwd.de

DR. FRANK BEYRICH
Deutscher Wetterdienst
GB Forschung und Entwicklung
Meteorologisches Observatorium Lindenberg
Am Observatorium 12
15848 Tauche/OT Lindenberg
E-Mail: frank.beyrich@dwd.de

DIPL.-MATH. HORST DIER
Deutscher Wetterdienst
GB Forschung und Entwicklung
Meteorologisches Observatorium Lindenberg
Am Observatorium 12
15848 Tauche/OT Lindenberg
E-Mail: horst.dier@dwd.de

DR. DIRK ENGELBART
Deutscher Wetterdienst
GB Forschung und Entwicklung
Meteorologisches Observatorium Lindenberg
Am Observatorium 12
15848 Tauche/OT Lindenberg
E-Mail: dirk.engelbart@dwd.de

PROF. DR. THOMAS FOKEN
Universität Bayreuth
Abteilung Mikrometeorologie
Universitätsstraße 30
95447 Bayreuth
E-Mail: thomas.foken@uni-bayreuth.de

PROF. DR. HARTMUT GRAßL
Max-Planck-Institut für Meteorologie
Bundesstraße 53
20146 Hamburg
E-Mail: grassl@dkrz.de

DR. ULRICH LEITERER
Deutscher Wetterdienst
GB Forschung und Entwicklung
Meteorologisches Observatorium Lindenberg
Am Observatorium 12
15848 Tauche/OT Lindenberg
E-Mail: ulrich.leiterer@dwd.de

DR. JOACHIM NEISSER
Libboldallee 7
12527 Berlin
E-Mail: joachimneisser@aol.com

DR. HANS STEINHAGEN
Am Observatorium 14
15848 Tauche/OT Lindenberg
E-Mail: hans.stonehenge@web.de

DR. MICHAEL WELLER
Deutscher Wetterdienst
GB Forschung und Entwicklung
Meteorologisches Observatorium Lindenberg
Am Observatorium 12
15848 Tauche/OT Lindenberg
E-Mail: michael.weller@dwd.de