

# promet

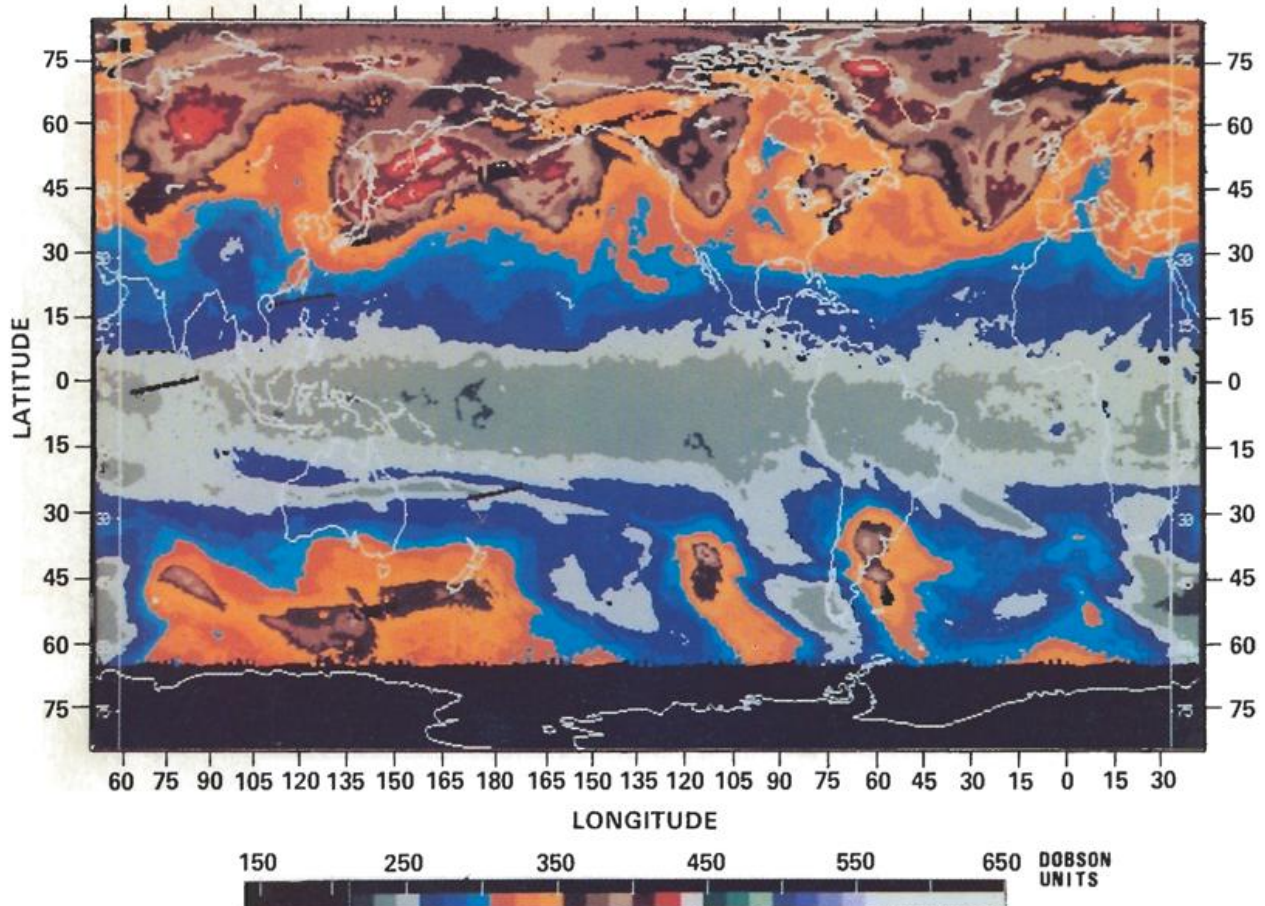
# 4'86

meteorologische fortbildung

## Ozon I

NIMBUS 7 TOMS TOTAL OZONE

MAY 29, 1979



**Herausgeber**

Deutscher Wetterdienst

**Hauptschriftleiter**

Dipl.-Met. M. Schlegel

**Redaktionsausschuß**

Prof. Dr. A. Baumgartner (München)  
 Prof. Dr. F. Fiedler (Karlsruhe)  
 Prof. Dr. H.-W. Georgii (Frankfurt)  
 Prof. Dr. H. Hinzpeter (Hamburg)  
 Dr. H. Reiser (Offenbach)  
 Dr. R. Simonis (Neustadt a. d. Weinstr.)  
 Dr. R. Paulus (Traben-Trarbach)  
 Prof. Dr. F. Wippermann (Darmstadt)

**Zum Titelbild:**

Globale Verteilung des Gesamt Ozons am 29.05.1979 aufgrund der TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer)-Daten (s. Beitrag 4).

(Das Farbbild wurde freundlicherweise von Dr. A. J. Krueger, NASA Goddard Flight Center, zur Verfügung gestellt.)

**promet** erscheint im Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes — Zentralamt — Frankfurter Straße 135, 6050 Offenbach am Main. Bezugspreis pro Jahrgang (4 Hefte) DM 36,—, Einzelheft DM 10,—.

Für den Inhalt der Arbeiten sind die Autoren verantwortlich. Alle Rechte bleiben vorbehalten.

Druck: Schön & Wetzels GmbH, Offenbacher Landstraße 368, 6000 Frankfurt (Main).

ISSN 0340-4552

**Meteorologische Fortbildung**

16. Jahrgang, Heft 4, 1986

Thema des Heftes:

**Ozon I**

(Fachliche Redaktion: W. Attmannspacher, Peiting)

**Beiträge:**

	Seite
<b>Einführung</b> (W. ATTMANNSPACHER)	1
H. U. DÜTSCH	
1 Die Geschichte der atmosphärischen Ozonforschung	2
R. D. BOJKOV	
2 Messungen mit Spektrometern und Filtergeräten	7
U. KÖHLER	
3 Dobson-Spektrometer 104—Brewer-Spektrometer 10. Ein Langzeitvergleich am Meteorologischen Observatorium Hohenpeißenberg	12
C. L. MATEER	
4 Satellitenmessungen des Gesamt Ozons	15

**Aus dem Deutschen Wetterdienst**

20 Jahre operationelle numerische Wettervorhersage im Deutschen Wetterdienst (W. EDELMANN) 21

**Aus der Weltorganisation für Meteorologie**

IMO-Preis für Prof. Dr. Herrmann Flohn (D. FRÖMMING) 26

**Habilitationen, Promotionen und Diplomhauptprüfungen an den Universitäten in der Bundesrepublik Deutschland und in Berlin (West) im Jahre 1985 (2. Teil)** 25

**Buchbesprechungen-Neuerscheinungen** 27

**Themen der Promet-Jahrgänge 1 (1971) bis 16 (1986)** 3. Umschlags.

# Thema des Heftes:

## Ozon I

---

### **Einführung**

*Ohne das Spurengas Ozon in der Atmosphäre wäre auf unserer Erde kein Leben in den heute uns bekannten Formen möglich. Wir Menschen, die meisten Tiere und viele Pflanzen konnten das kurzwellige UV der Sonne nicht ertragen, vor dem uns das Spurengas Ozon schützt.*

*Diese Eigenschaft des Ozons, kurzwellige Solarstrahlung zu absorbieren, erzeugt im oberen Grenzbereich der Ozonschicht der Atmosphäre (in etwa 40–50 km Höhe) vom Sonnenstand abhängige Temperaturen und schließlich Luftdruckgegensätze, die für die sehr beständigen Ostwinde im „Sommer“ (etwa April/Mai bis August/September) bzw. die beständigen Westwinde in den verbleibenden „Wintermonaten“ verantwortlich sind.*

*Der Gedanke, daß Änderungen der atmosphärischen Ozonschicht Auswirkungen auf die Zirkulation der Stratosphäre, möglicherweise indirekt auch auf das troposphärische Wettergeschehen haben könnten, führte vor mehr als zwei Jahrzehnten zum Aufbau einer Ozonmeßstation am Meteorologischen Observatorium Hohenpeißenberg und damit zur Zweckforschung auf diesem Gebiet. Bereits vorher waren mit ungenauen Geräten sporadisch Messungen des bodennahen Ozons gemacht worden. Durch die fortschreitende industrielle Entwicklung in vielen Ländern zeigten sich in den letzten Jahren mögliche anthropogene Störungen des stratosphärischen Ozon-Schutzschildes und Änderungen des troposphärischen Ozonanteils.*

*Genauere, möglichst langjährige Messungen dieses Spurengases der Atmosphäre und Untersuchungen über sein Verhalten bekamen so immer größere Bedeutung.*

*Das vorliegende Promet-Heft und das folgenden Doppelheft 1/2 '87 sollen einen leicht verständlichen Einblick in die Messung und Erforschung des atmosphärischen Ozons geben. Es gelang, international anerkannte Fachleute als Autoren für die einzelnen Beiträge zu gewinnen. Die Richtschnur der leichten Verständlichkeit erforderte eine Übersetzung der teilweise englischen Beiträge ins Deutsche.*

*Nach einem historischen Überblick im Beitrag 1 werden Messungen und Meßergebnisse des Gesamtozons der Atmosphäre über einem Punkt und über großen Teilen der Erde in den Beiträgen 2 bis 4 vorgestellt. Über Spektrophotometer und Filtergeräte zur Messung des Totalozons gibt R. BOJKOV Auskunft (Beitrag 2). U. KÖHLER berichtet über einen mehrjährigen Vergleich zwischen einem Dobson- und einem Brewer-Spektrophotometer (Beitrag 3). Meßmöglichkeiten und Gesamtozon-Meßergebnisse mit Hilfe von Erdsatelliten zeigt C. L. MATEER auf (Beitrag 4).*

*Die Beiträge 5 bis 11 befaßen sich mit der vertikalen Verteilung des Ozons. Im Beitrag 5 stellt R. HARTMANNSGRUBER, die heute fast ausschließlich benutzte naßchemische Methode der Ozonmessung am Ballon vor. Der Beitrag 6 von A. KRUEGER ist der Möglichkeit, Raketen als Träger für Ozonsensoren zu benutzen, gewidmet. Indirekte Methoden zur Erfassung des vertikalen Ozonprofils werden in den Beiträgen 7 und 8 vorgestellt. H. U. DÜTSCH befaßt sich dabei mit der sogenannten „Umkehrmethode“, mit deren Hilfe man mit Ozon-Spektrophotometern Aussagen über die Verteilung des Ozons bis in Höhen über 40 km erhalten kann (Beitrag 7). Den umgekehrten Weg, aufgrund von Satellitenmessungen von oben Aussagen über die vertikale Verteilung des Ozons zu erhalten, schildert C. L. MATEER im Beitrag 8. In den Beiträgen 9 bis 11 werden Neuentwicklungen von Ozonsensoren vorgestellt. Die Arbeit von H. WALTHER und K. W. ROTHE stellen das an diesem Institut entwickelte Ozonlidar vor (Beitrag 9). N. KÄMPFER und K. KÜNZI berichten über ihr Ozonmeßgerät, dem die Mikrowellentechnik zugrunde liegt (Beitrag 10). Der Beitrag 11 von W. KOMHYR befaßt sich mit einer speziellen Ballonsonde, mit der Messungen bis in 40 km Höhe möglich sind.*

*In den letzten Jahren haben besonders bodennahe Ozonregistrierungen an Bedeutung gewonnen. H. CLAUDE berichtet im Beitrag 12 über heute übliche Meßmethoden und grundlegende Meßergebnisse. Die Ozonverteilung über den Meeren ist bis heute nur wenig erforscht; damit befaßt sich der Beitrag 13 von P. WINKLER.*

*Während in den Beiträgen 1 bis 13 die Meßtechnik und die Meßergebnisse dominieren, macht der Beitrag 14 von D. E. EHHALT mit den Grundlagen der stratosphärischen Ozonchemie vertraut.*

*Im Beitrag 15 berichtet W. ATTMANNSPACHER über die ab 1967 am Meteorologischen Observatorium Hohenpeißenberg begonnenen Ozonmessungen mit der auch heute noch verwendeten Sonde und über einige wichtige Ergebnisse auf dem Gebiet der Ozonforschung.*

*R. SATORIUS befaßt sich im Beitrag 16 mit dem Problem Ozon und Umwelt.*

*Die Auswirkungen des Spurengases Ozon auf den Menschen sind Thema des Beitrags 17 von D. DIRNAGL und J. KLEINSCHMIDT.*

In letzter Zeit unterstreichen die in allen Kommunikationsmedien gebrachten Hinweise und Kommentare über das gefundene antarktische „Ozonloch“ erneut die Wichtigkeit der Messung und Erforschung des Ozons in unserer Erdatmosphäre. Fachlich gesehen handelt es sich dabei um sehr tiefe, bisher nicht gemessene Werte in der vertikalen Verteilung des Ozons über der Antarktis. Die Beiträge zu diesem Thema zeigen, daß sich aus dem am Ort oder in der Höhe ablaufenden photochemischen Prozessen, dem dynamischen, also vom Wettergeschehen verursachten Ozontransport, und der natürlichen, heute leider auch anthropogen verursachten Ozonzerstörung ein Gleichgewichtszustand einstellt; all diese Vorgänge liefern dann die vertikale Ozonverteilung. Über den Polbereichen fehlt im Winter die erstgenannte Ozonquelle völlig. Dynamisch verursachte Ozontransportänderungen können so bereits stark zurückgehende Ozonwerte verursachen; außerdem fehlen über dem antarktischen Bereich lange Messreihen. Bereits aus diesen Gründen ist es verständlich, daß bis heute die Ursache für diese extremen Ozonminima über der Antarktis noch nicht geklärt ist.

Aus allem ergibt sich die Notwendigkeit einer genauen globalen Erfassung des Ozongehalts der Atmosphäre, um signifikante Aussagen über Trends machen zu können.

Mein Dank gilt allen Autoren und Herrn Dr. Wege für die große Unterstützung und Mitarbeit bei der fachlichen Redaktion.

W. ATTMANNPACHER

## Bei der Messung des Ozons verwendete Einheiten

### 1 Einheiten

Leider werden bei der Angabe der Ozonkonzentration unterschiedliche Maßeinheiten verwendet. Die dominierenden international üblichen werden daher nachfolgend aufgeführt:

#### 1.1 Ozonpartialdruck $p_3$ [nbar] (ozone partial pressure)

Anmerkung: 1 nbar  $\hat{=}$  0.1 mPa

#### 1.2 Ozonpartialdichte $\rho_3$ [ $\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$ ] (ozone density)

#### 1.3 Volumenmischungsverhältnis $X_3$ [ppb(v)] (volume mixing ratio)

Anmerkung: ppb bedeutet parts per billion,  $10^{-9}$ .

#### 1.4 Massenmischungsverhältnis $m_3$ [ $\frac{\mu\text{g}}{\text{g}}$ ] (mass mixing ratio)

#### 1.5 Dobson-Einheit DU (Dobson unit)

Integrierter Gesamt ozongehalt der Atmosphäre, dargestellt in einer Ozonsäule reduziert auf Normalbedingungen ( $T = 273 \text{ K}$ ,  $p = 1013 \text{ hPa}$ ).

1 cm Ozonsäule entspricht  $10^3$  DU, d.h. die Höhe einer Ozonsäule von 3 mm entspricht 300 DU.

Manchmal ist noch die Bezeichnung milli-atmo-centimeter (m-atm-cm) in Gebrauch.

### 2 Umrechnungsformeln

Bei den Formeln bedeuten:

$p$  Luftdruck [hPa]

$T$  Temperatur [K]

Bei den Ozonmaßeinheiten gelten die unter 1 aufgeführten Dimensionen.

#### 2.1 Ozonpartialdruck

$$\begin{aligned} p_3 [\text{bar}] &= 1,7322 \cdot 10^{-3} \cdot T \cdot \rho_3 && \text{(Ozonpartialdichte)} \\ &= 1 \cdot 10^{-3} \cdot p \cdot X_3 && \text{(Volumenmischungsverhältnis)} \\ &= 0,602 \cdot p \cdot m_3 && \text{(Massenmischungsverhältnis)} \end{aligned}$$

#### 2.2 Ozonpartialdichte

$$\begin{aligned} \rho_3 [\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}] &= 577,3 \cdot \frac{p_3}{T} && \text{(Ozonpartialdruck)} \\ &= 0,5773 \cdot \frac{p}{T} \cdot X_3 && \text{(Volumenmischungsverhältnis)} \\ &= 0,347 \cdot 10^3 \cdot \frac{p}{T} \cdot m_3 && \text{(Massenmischungsverhältnis)} \end{aligned}$$

#### 2.3 Volumenmischungsverhältnis

$$\begin{aligned} X_3 [\text{ppb(v)}] &= 1 \cdot 10^3 \cdot \frac{p_3}{p} && \text{(Ozonpartialdruck)} \\ &= 1,7322 \cdot \frac{T}{p} \rho_3 && \text{(Ozonpartialdichte)} \\ &= 0,602 \cdot 10^3 \cdot m_3 && \text{(Massenmischungsverhältnis)} \end{aligned}$$

#### 2.4 Massenmischungsverhältnis

$$\begin{aligned} m_3 [\frac{\mu\text{g}}{\text{g}}] &= 1,66 \cdot \frac{p_3}{p} && \text{(Ozonpartialdruck)} \\ &= 2,88 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{T}{p} \rho_3 && \text{(Ozonpartialdichte)} \\ &= 1,66 \cdot 10^{-3} \cdot X_3 && \text{(Volumenmischungsverhältnis)} \end{aligned}$$

# Die Geschichte der atmosphärischen Ozonforschung

## 1 Entdeckung

Es ist nun genau 200 Jahre her, daß van MARUM bei elektrischen Entladungen in Sauerstoff einen charakteristischen, intensiven Geruch feststellte, eine Beobachtung, die von anderen auch bei der Elektrolyse gemacht wurde. Aber erst um 1840 erkannte SCHÖNBEIN in Basel, daß dieser Geruch dem Auftreten eines bestimmten Gases zuzuschreiben sei, dem er entsprechend den Namen „Ozon“, d.h. das Ricchende gab. Es dauerte aber noch einige Zeit bis eindeutig festgestellt wurde, daß Ozon eine dreiatomige Modifikation des Sauerstoffes ist.

Bereits SCHÖNBEIN erkannte die starke Oxidationswirkung des neuen Gases und benützte sie zum Nachweis desselben mit Hilfe von mit Kaliumjodid und Kleister getränktem Papier, dessen Verfärbung durch Jodstärkebildung bei einer gewissen Dauer der Exposition ein relatives Mass für den Ozongehalt der Luft ist. Die von ihm angeregten und vielerorts aufgenommenen Messungen sind z.B. in Wien über fast 70 Jahre hinweg fortgeführt worden. Eine quantitative (absolute) Meßmethode wurde von HOUZEAU und LEWY bald darauf entwickelt; sie zeigte, wie außerordentlich gering der Ozongehalt der bodennahen Luft ist.

## 2 Ozon in der hohen Atmosphäre

CORNU hatte 1879 nicht nur den plötzlichen Abbruch des Sonnenspektrums unterhalb von 300 nm, sondern auch die Verschiebung dieses kurzwelligen Endes zu längeren Wellen mit abnehmender Sonnenhöhe festgestellt, woraus er schloß, daß der Abbruch nicht eine inherente Eigenschaft des Sonnenspektrums sei, sondern durch die Erdatmosphäre verursacht werden müsse. Der im gleichen Wellenbereich beobachtete Abbruch verschiedener Sternspektren bestätigte diese Interpretation. Nur ein Jahr später entdeckte HARTLEY die äußerst intensive Absorption des Ozons in den nach ihm benannten Banden (ungefähr zwischen  $\lambda = 220$  und  $320$  nm). Er schloss daraus, daß der Abbruch des Sonnenspektrums durch den Ozongehalt der Atmosphäre verursacht werde, und daß auf Grund des geringen gemessenen Ozongehalts in Bodennähe dieses Ozon im wesentlichen Bestandteil der hohen Atmosphäre sein müsse. Diese, wie wir heute wissen, korrekte Interpretation blieb aber, da sie nicht quantitativ untermauert war, vorderhand eine nicht unangefochtene Hypothese.

Den eindeutigen und quantitativen Beweis für die Existenz einer Ozonschicht in der oberen Atmosphäre erbrachten erst FABRY und BUISSON mit Arbeiten gerade vor und nach dem ersten Weltkrieg. Sie wiederholten die Messungen der Absorptionskoeffizienten, vor allem auch im Bereich des ausklingenden Sonnenspektrums und konstruierten einen photographischen Doppelmonochromator, mit dem sie im Mai und Juni 1920 an einer Reihe von Tagen systematische Aufnahmen bei verschiedenen Sonnenhöhen machten. Sie konnten mit Hilfe eines sog. Langley-Plots ( $\log I$  resp.  $\log I/I'$  als Funktion der Weglänge durch die Atmosphäre) zeigen, daß die Strahlungsschwächung bei einer bestimmten Wellenlänge proportional zum Ozonsabsorptionskoeffizienten war, was

Ozon eindeutig als einzigen Verursacher des spektralen Abbruchs nachwies und gleichzeitig erlaubte, quantitativ den Ozongehalt der Atmosphäre zu bestimmen, der sich für die vertikale Säule zu etwa 3 mm reinen Ozons bei Normalbedingungen ergab. Gleichzeitig stellten sie von Tag zu Tag Schwankungen dieses Gesamt ozonegehaltes der Atmosphäre fest und gaben dadurch den Anstoß zu den systematischen Beobachtungen, mit denen DOBSON noch im gleichen Jahrzehnt grundlegende Kenntnisse über die Ozonverteilung in der Atmosphäre schuf. Noch bevor aber DOBSON seine Messungen aufnahm, existierte bereits ein sich über mehr als ein Jahrzehnt erstreckender Datensatz, der von ABBOT und FOWLE auf dem Mt. Wilson (1908—1920) und über kurze Zeit auch in Calama (Chile), 1918—1920, im Zusammenhang mit den Solarkonstantenbestimmungen der Smithsonian Institution aufgenommen worden war. Diese Datenreihe wurde 1927 von CABANNES und DUFAY ausgewertet und ergab gute Übereinstimmung mit FABRY und BUISSONS Gesamt ozonewerten, sowie mit dem von DOBSON inzwischen gefundenen (und von GÖTZ schon vorher mit einfachen Cadmiumzellenmessungen festgestellten) Jahresgang des Ozons.

## 3 Die systematischen Untersuchungen des Gesamt ozons durch DOBSON (Abb. 1)

Im Jahr 1922 stellten LINDEMANN und DOBSON mit ihren bahnbrechenden Meteoruntersuchungen — im Gegensatz zu allen damaligen Vorstellungen — die Existenz einer warmen Schicht in etwa 50 km Höhe fest. LINDEMANN vermutete, daß UV-Absorption durch Ozon dafür verantwortlich sei. Da die Aufstiege DINES mit selbstregistrierenden, von Ballonen getragenen meteorologischen Instrumenten bereits gezeigt hatten, daß die untere Stratosphäre über Zyklonen wärmer sei als über Antizyklonen, vermutete LINDEMANN, das möglicherweise dieser Temperaturunterschied auf variablen Ozongehalt der Stratosphäre zurückzuführen sei, und das möglicherweise auch die Bildung von Zyklonen und Antizyklonen eine Folge des veränderlichen Ozongehalts wäre. Wir wissen heute, daß weder das eine noch das andere zutrifft. Die geäußerten Vermutungen ließen es aber als wünschenswert erscheinen, systematische Ozonmessungen durchzuführen. Es ist dies ein schönes Beispiel für den in der Wissenschaft nicht allzu seltenen Fall, daß die Verfolgung einer an sich völlig falschen Hypothese zu wertvollen Resultaten führen kann.

Aus Geldmangel mußte für diese Untersuchungen ein möglichst einfaches Instrument im eigenen Laboratorium gebaut werden, nämlich ein mit einem Fery-Quarz-Prisma ausgerüsteter Monochromator für photographische Aufnahmen, wobei die Störung durch Streulicht aus dem viel intensiveren sichtbaren Spektralbereich durch einen Chlor/Brom-Filter eliminiert wurde. Zur exakten und gleichzeitig effizienten Auswertung der aufgenommenen Spektren mußte eine spezielle Plattenentwicklungsmethode sowie ein Mikrodensimeter zur Schwärzungsmessung auf sehr kleiner Fläche entwickelt werden.

Die systematische Anwendung des neuen Instrumentes zeigte einen nach den damaligen Erwartungen überraschenden Jahresgang mit einem Frühjahrsmaximum und einem Herbstminimum, sowie beträchtliche Tag-zu-Tag-Schwankungen mit auffälliger negativer Korrelation zwischen Bodendruck und Ozongehalt.

Mit Hilfe von 5 weiteren, von DOBSON und Mitarbeitern selbstgebauten und unter sich verglichenen Instrumenten wurde 1926/27 in Europa ein kleines synoptisches Netz mit den Stationen Oxford (England), Valentia (Irland), Lerwick (Shetland-Insel), Abisko (Schweden), Lindenberg (Deutschland) und Arosa (Schweiz) aufgebaut. Die exponierten photo-



Abb. 1: G. M. B. Dobson

graphischen Platten kamen alle zur einheitlichen Verarbeitung nach Oxford zurück, was einen enormen Arbeitsaufwand verursachte (über 5000 Spektren).

Die Resultate ergaben eine übersichtsmässige Vorstellung von der Verteilung von Ozon relativ zu Drucksystemen und auch erste Kenntnisse über die Breitenabhängigkeit der Ozonschichtdicke. Aus diesem Grund wurden die Instrumente in einem zweiten Versuch 1928/29 über die ganze Welt verteilt: Table Mountain (Californien), Heluan (Aegypten), Kodaikanal (Südindien) und Christchurch (Neuseeland), während in Europa nur die Apparate in Oxford und Arosa verblieben (letzterer wurde im Sommer 1929 in Spitzbergen eingesetzt). Als Resultat dieses Experiments war die Variation des Ozons nach Jahreszeit und geographischer Breite, mit dem praktisch jahreszeitunabhängigen tropischen Minimum, dem Maximum in hohen Breiten und der in dieser Richtung zunehmenden Amplitude der Jahresschwankung (auf der Südhemisphäre um ein halbes Jahr phasenverschoben) am Ende der zwanziger Jahre bekannt. Was noch fehlte waren Messungen in der Polarnacht, die erst in den fünfziger Jahren mit dem verbesserten photoelektrischen Dobsonspektrophotometer möglich wurden. Als spezielle Überraschung kam schließlich im Internationalen Geophysikalischen Jahr 1957/58 die Erkenntnis der Asymmetrie zwischen Antarktis und Arktis hinzu, die sich in den 1928/29 gemachten Messungen in mittleren und niedrigen Breiten nicht gezeigt hatte.

#### 4 Die klassische photochemische Theorie des Ozons

Nachdem bereits vermutet worden war, daß das Ozon in der hohen Atmosphäre durch solares Ultraviolett gebildet werde, stellte CHAPMAN (Abb. 2) 1930 eine photochemische Theorie auf, auf welche sich die weitere Entwicklung bis Mitte der sechziger Jahre im wesentlichen abstützte (sog. klassische Theorie). Nach CHAPMAN wird der Ozongehalt der Atmosphäre im wesentlichen durch die vier Reaktionen

1.  $O_2 + h\nu \rightarrow O + O \quad \lambda \leq 242 \text{ nm}$
2.  $O_2 + O + M \rightarrow O_3 + M$
3.  $O_3 + h\nu \rightarrow O_2 + O \quad \lambda \leq 1180 \text{ nm}$
4.  $O_3 + O \rightarrow 2 O_2$

bestimmt.

CHAPMAN selbst führte keine quantitativen Rechnungen durch; doch schon ein Jahr später leitete MECKE eine geschlossene Formel für die vertikale Ozonverteilung ab, wozu er aber so gravierende Vereinfachungen vornehmen mußte, daß das Resultat keine Aussagekraft mehr besaß. Die ersten nichtvereinfachten quantitativen Rechnungen auf der von CHAPMAN geschaffenen Grundlage verdanken wir am Ende der 30er Jahre WULF und DEMING, wobei aber nur senkrechter Sonnenstand angenommen wurde.



Abb. 2: Sydney Chapman bei einer autobiographischen Vorlesung am Geophysical Institute, University of Alaska, Juli 1967

Erst in den 40er Jahren zeigten SCHRÖER, DÜTSCH und CRAIG unabhängig voneinander — durch Weiterführung der Rechnungen von WULF und DEMING für verschiedene Sonnenhöhen und Temperaturprofile — daß die beobachtete Ozonverteilung nach Jahreszeit und geographischer Breite nicht der nach der photochemischen Theorie zu erwartenden entspricht. Während Minimalwerte des Gesamtozons in niedrigen Breiten und Maximalwerte im Polargebiet schon durch DOBSON erstes weltweites Netz gesichert waren, verlangten die theoretischen Rechnungen übereinstimmend ein äquatoriales Maximum und ein polares Minimum: es ergab sich auch eine Phasenverschiebung zwischen theoretischem und beobachtetem Jahresgang. Andererseits führte die Berücksichtigung eines gegenüber dem ursprünglich verwendeten schwarzen Strahler von 6000 °K verstärkten Intensitätsabfalles im solaren Ultraviolett sowie der von HEILPERN entdeckten

Abweichungen vom Beerschen Gesetz in der Sauerstoffabsorption im Bereich des Herzbergkontinuums ( $\lambda > 195 \text{ nm}$ ) zu einer recht guten Übereinstimmung des Gesamt Ozons im globalen Durchschnitt sowie auch der vertikalen Verteilung mit den Beobachtungen. Der Schluß lag deshalb nahe, daß die Differenzen zwischen Theorie und Beobachtung in Bezug auf Breitenabhängigkeit und Jahresgang des Gesamt Ozons auf eine Umverteilung des Ozons durch Transportvorgänge im unteren Teil der Stratosphäre (wie auch der Troposphäre) zurückzuführen seien, da die Rechnungen auch zeigten, daß unterhalb 25–30 km Abweichungen vom photochemischen Gleichgewicht nur noch sehr langsam korrigiert werden (Relaxationszeit von Monaten bis über ein Jahr). Zum Beweis dieser Hypothese waren aber systematische Beobachtungen der vertikalen Verteilung notwendig, wie sie damals nicht zur Verfügung standen.

## 5 Die vertikale Ozonverteilung

Aus dem Vergleich zwischen Gesamt Ozon und bodennahen Konzentrationsmessungen des Spurengases konnte mit Sicherheit abgeleitet werden, daß Ozon im wesentlichen ein Bestandteil der hohen Atmosphärenschichten war. Wegen der Existenz einer warmen Schicht in etwa 50 km Höhe und als Resultat von Gesamt Ozonmessungen bei sehr tiefen Sonnenständen in einer gekrümmten Atmosphäre (Weglänge als Funktion der Höhe) wurde zunächst eine Höhenlage von 40–50 km angenommen, wobei aber die Meßmethode als sehr fehleranfällig zu betrachten war.



Abb. 3: Paul Götz

Die ersten besser fundierten Anhaltspunkte erhielt man zu Anfang der 30er Jahre durch die Auswertung des sog. Umkehr- oder Götz-Effektes (Zenithimmelslichtmessungen als Funktion der Sonnenhöhe). Diese setzten den Schwerpunkt der Ozonschicht in mittleren Breiten auf ungefähr 22 km herunter. Wegen des arbeitsintensiven Auswertungsverfahrens wurde die routinemäßige Anwendung dieser Methode

aber erst fast 30 Jahre später durch „objektive“, d.h. genau vergleichbare Resultate liefernde Computerauswertungen ermöglicht.

Die erste direkte Bestimmung der vertikalen Ozonverteilung, die Vater und Sohn REGENER mit dem bahnbrechenden Flug eines kleinen Spektographen an einem Radiosondenballon 1934 erzielten, ergab eine Bestätigung der durch die Umkehrmethode gezeigten tiefen Lage der Ozonschicht. Obschon die vertikale Auflösung wesentlich besser war als die einer indirekten Methode, verblieben Verschmierungseffekte infolge schichtweiser Auswertung durch Differenzbildung aufeinanderfolgender Spektren, die auch eine gewisse Fehlerquelle bedeuteten (kleine Differenzen — große Werte). Letzteres galt in erhöhtem Maße für die optischen Sonden (relativ breitbandige Filter anstelle des Spektographen), die anschließend zur Momentanmessung (Telemetrierung der Daten) durch PAETZOLD und durch Mme VASSY entwickelt wurden und schon in den 50er Jahren serienmäßige Aufstiege erlaubten.

Die eigentliche in situ Messung des atmosphärischen Ozongehaltes wurde vor 1960 beginnend mit der Entwicklung chemischer, mit einer Rasiosonde gekoppelter Ozonsonden realisiert. Die drei wichtigsten Typen sind der Brewer-Bubbler und die Komhyr-Konzentrationszelle, welche beide auf der KJ-Ozonreaktion basieren, sowie REGENER Chemilumineszenz-Sonde. Während die beiden naßchemischen Instrumente in ihrer maximalen Meßhöhe durch den Tripelpunkt der verdünnten KJ-Lösung (6,1 mb) beschränkt sind, ist dies bei der trockenen Chemilumineszenz, welche außerdem die feinste vertikale Auflösung ergibt, nicht der Fall; trotzdem mußte dieses Verfahren nach der Verwendung im ersten quasisynoptischen Netz in Nordamerika (1963–65) wegen ungenügender Stabilität des Sensors schließlich aufgegeben werden. Das seit 1966 teilweise bis heute betriebene europäische Netz benutzt die Brewer-Sonde, während weitere Meßreihen in Canada und den USA beide naßchemischen Typen verwenden, ebenso praktisch alle übrigen weltweit durchgeführten Messungen.

Schon in der Frühzeit der Sonden wurden Instrumenten- und Methodenvergleiche durchgeführt (z. B. Arosa 1958, 1961, 1962), um eine Zuverlässigkeit zu überprüfen und Erfahrungen für weitere Entwicklungsarbeiten zu sammeln. Die Vergleiche in Hohenpeißenberg (1970 und 1978) dienten dann der Sicherung der Vergleichbarkeit zwischen den nun systematisch betriebenen Meßnetzen.

Die Ozonkonzentration oberhalb etwa 35 km schließlich wurde mit Raketeneinsatz von speziellen optischen und Chemilumineszenzsonden erschlossen. Ein internationaler Instrumentenvergleich in Wallops Island zeigte aber noch beträchtliche Unsicherheiten.

## 6 Satellitenbeobachtung

Der letzte Schritt in der Entwicklung der Meßtechnik griff mit dem Einsatz von Satelliten wieder auf indirekte Methoden zurück, mit der damit verbundenen Verminderung der Detailgenauigkeit, dafür aber mit einer globalen Datenüberdeckung. Für Gesamt Ozonmessungen wurden die infrarote Nadirmessung (Emission durch die Ozonschicht) und mit besserer Genauigkeit verschiedene Versionen von BUV (Backscatter-

Ultraviolett) -Instrumenten (Messung des von der Atmosphäre resp. vom Boden zurückgestreuten UV-Sonnenlichtes, das von der Ozonschicht geschwächt wird) verwendet. Das BUV-Instrument kann durch Verwendung kürzerer Wellenlängen (Rückstreuung in verschiedenen Höhen) auch die vertikale Verteilung erschließen, wobei die Meßgenauigkeit in größeren Höhen ungefähr derjenigen der verwandten Umkehrmethode entspricht. Eine bessere vertikale Auflösung wurde 1979 mit dem LIMS-Experiment (Limb Infrarot Monitoring System) erreicht, welches infrarote Ozonemission aus dem Bereich von Erdtangenten mit variablem Elevationswinkel (gleichzeitig mit der Temperatur) mißt. In der unteren Stratosphäre nimmt aber auch hier die Zuverlässigkeit rasch ab. Obschon dieser Datensatz wegen der notwendigen kryogenen Kühlung des Sensors nur sieben Monate umfassen konnte, kam ihm wegen simultaner Messung der Felder anderer wichtiger Spurengase ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{NO}_2$ ) besondere Bedeutung zu, dies speziell im Hinblick auf die neue Dimension, welche das Ozonproblem im Laufe der letzten zwanzig Jahre mit der Entwicklung der modernen photochemischen Theorie (und der damit möglich erscheinenden anthropogenen Beeinflussung der Schicht) erhalten hat.

Moderne Technologie hat auch zur Entwicklung neuer, am Boden einsetzbarer indirekter Methoden geführt, so der passiven Mikrowellentechnik, welche die Druckabhängigkeit der Emissionslinie in diesem Wellenbereich zur Messung der vertikalen Verteilung des Ozons benutzt, und der aktiven Lasertechnik, welche die Ozonschwächung des in verschiedenen Niveaus zurückgestreuten Laserlichts ausnützt und damit eine gute vertikale Auflösung erreicht.

## 7 Die moderne photochemische Theorie

Mit der Entdeckung von HAMPSON (1964), daß das bei der Photodissoziation des Ozons durch Wellenlängen  $< 310$  nm entstehende angeregte Sauerstoffatom  $\text{O} (^1\text{D})$  für die Bildung von  $\text{HO}_x$ -Radikalen aus Wasserdampf und die dadurch bewirkte katalytische Ozonzerstörung von Bedeutung ist, wurde eine Entwicklung eingeleitet, die in den folgenden 10 Jahren die photochemische Theorie des Ozons auf eine völlig neue Grundlage stellte.

1970/71 wurde durch CRUTZEN, NICOLET und JOHNSTON die entsprechende katalytische Wirksamkeit von  $\text{NO}_x$ -Radikalen demonstriert, die durch die Einwirkung von  $\text{O} (^1\text{D})$  auf  $\text{N}_2\text{O}$  gebildet werden. Schließlich zeigten 1973/74 STOLARSKI und CICERONE sowie ROWLAND und MOLINA die entsprechende Bedeutung der  $\text{ClO}_x$ -Gruppe. Während in der mittleren und oberen Stratosphäre die drei erwähnten Radikalgruppen Ozon zerstören und damit das Gleichgewicht zu kleineren Werten verschieben, wird — bei Anwesenheit von genügend  $\text{NO}_x$ , dem hier ebenfalls katalytische Wirksamkeit zukommt — in der hauptsächlich durch die OH-Radikale eingeleiteten Zerfallsreihe des Methans (und auch anderer natürlicher Kohlenwasserstoffe) Ozon gebildet, ein Vorgang, der in der untersten Stratosphäre und vor allem in der Troposphäre den photochemischen Prozessen — im Gegensatz zur klassischen Theorie — wieder beträchtliche Bedeutung zuweist.

In der geschilderten Entwicklung, bei der die 4 Reaktionen der klassischen Theorie durch über 100 ersetzt worden waren, und neben den permanenten Bestandteilen  $\text{O}_2$  und  $\text{N}_2$  vor allem eine Menge von Spurenstoffen mit Quellen und

Senken eine Rolle spielten, wurde nun eine mögliche Beeinflussung der Ozonschicht durch den Menschen aktuell und löste in den 70er Jahren eine Reihe größerer Forschungsprogramme aus. Während die neue Theorie selbst in den letzten 10 Jahren keine grundlegenden Veränderungen mehr erfahren hat, war die aus Modellrechnungen prognostizierte mögliche anthropogene Beeinflussung der Ozonschicht noch großen Schwankungen ausgesetzt, vor allem infolge von Änderungen von auf Laboratoriumsmessungen beruhenden Reaktionskonstanten, daneben auch wegen der Entdeckung einiger zusätzlicher, das System beeinflussender Reaktionen und Verbindungen. Während die für eine (noch ferne) neue Gleichgewichtseinstellung als Folge der Chlorfluormethanabgabe an die Atmosphäre (Spraydosen etc.) prognostizierte Schwächung der Ozonschicht 1979 nahe an die 20% Grenze heranrückte (wobei nur der infolge der Überlappung von  $\text{O}_2$ - und  $\text{O}_3$ -Absorption im Bereich der sauerstoffdissoziierenden Strahlung immanente Selbstheilungseffekt der Ozonschicht einen noch viel größeren Schaden verhinderte), ergeben die Rechnungen gegenwärtig nur noch wenige Prozent Abnahme, die wegen der Temperaturabhängigkeit des Gleichgewichts infolge der erwarteten Abkühlung der Stratosphäre, bewirkt durch die kontinuierliche Zunahme des zwar photochemisch inaktiven aber strahlungswirksamen  $\text{CO}_2$ , praktisch aufgehoben wird, wozu noch die durch Methan- $\text{NO}_x$  bedingte Zunahme in der Troposphäre und untersten Stratosphäre das ihre beiträgt. Die befürchteten biologischen Wirkungen (infolge Zunahme der UV-Strahlung) treten damit gegenwärtig in den Hintergrund gegenüber möglichen klimatischen Folgen, bedingt einerseits durch die bei konstantem Gesamt Ozon veränderte vertikale Verteilung (Änderung der infraroten Gegenstrahlung des Ozons zusammen mit der Treibhauswirkung anderer Spurengase), zum anderen durch mögliche dynamische Rückwirkungen der resultierenden Temperatur- und Zirkulationsänderungen in der Stratosphäre auf die Troposphäre.

## 8 Überblick

Vor 60 Jahren standen der geophysikalische Aspekt (Begründung der eben entdeckten warmen Schicht in der oberen Stratosphäre) und eine mögliche direkte meteorologische Bedeutung des Ozons im Vordergrund. Mit dem Nachweis seiner Langlebigkeit in der unteren Stratosphäre und der Bedeutung des Transports für seine Verteilung konzentrierte sich etwa ab 1950 das Interesse auf Ozon als Tracer für nicht direkt meßbare Zirkulationsprozesse in der Stratosphäre. Die moderne photochemische Theorie hat das Ozon zur zentralen Substanz eines umfangreichen Spurengassystems gemacht, das Stratosphäre und Troposphäre umfaßt. Vor allem die Satellitenbeobachtungen der letzten Jahre haben ein weitgehend konsistentes Bild der chemischen Prozesse in der Atmosphäre, denen immer noch steigende Bedeutung zukommt, in ihrer Wechselwirkung mit den Transportvorgängen gezeigt. Was ursprünglich als Photosmog ein lokales, von der stratosphärischen Ozonschicht völlig getrenntes Phänomen zu sein schien, erweist sich nun als eine zwar örtlich verstärkte, aber mit weltweiten, auf die stratosphärische Ozonschicht rückwirkenden Vorgängen verbundene Erscheinung, in der sich der zunehmende menschliche Einfluß auf den Chemismus unserer Atmosphäre — Troposphäre und Stratosphäre — demonstriert, dessen Veränderung seinerseits die Zirkulations- und Strahlungsvorgänge und damit das Klima beeinflussen kann.

### 1 Einführung

Die ersten Messungen des Gesamtzongehalts einer vertikalen Säule über dem Beobachtungsort mit Hilfe optischer Instrumente wurden vor mehr als 70 Jahren von FABRY und BUISSON (1913) ausgeführt. Gesamtzongmessungen vom Boden aus erfordern entweder Spektrometer oder optische Filtertechnik. Gemessen wird die relative Abschwächung auf Grund der Ozonabsorption der solaren Strahlung in zwei oder mehreren Wellenlängen im Bereich der Huggins-Bande (ca. 300–340 nm) des Ultravioletts des Sonnenspektrums. Die Ozonabsorption ändert sich sehr scharf entlang dieses Spektralbereichs, so daß ab 290 nm praktisch keine Strahlung, auch von kürzeren Wellenlängen, bis zur Erdoberfläche gelangt. Bei 315 nm beträgt die Ozonabsorption nur mehr ein hundertstel der effektiven Rayleigh-Streuung. Die praktische Messung erfolgt mit Wellenlängenpaaren, die so ausgesucht werden, daß eine sehr stark und die andere nur ganz schwach vom atmosphärischen Ozon absorbiert wird. Die Differenz zwischen den gemessenen Strahlungen erlaubt die Berechnung des Gesamtzongs.

Definitionsgemäß beträgt die Gesamtzahl der Ozonmoleküle in einer vertikalen Säule mit der Basis 1 cm<sup>2</sup> vom Instrumentenort der Höhe z bis zu der Grenze der Atmosphäre:

$$N_3 = \int_0^z n_3 dz \quad (1)$$

wobei  $n_3$  die Zahl der Moleküle pro cm<sup>3</sup> darstellt. Reduziert auf Normaltemperatur und -druck ergibt sich damit die Gesamtzongmenge  $\Omega$  zu

$$\Omega = \frac{N}{L_0} \quad (2)$$

dabei ist  $L_0 = 2,69 \times 10^{19}$  Moleküle pro cm<sup>3</sup> (Loschmidt'sche Zahl). Die äquivalente Schichtdicke für mittlere Gesamtzongverhältnisse in der Erdatmosphäre beträgt  $\Omega = 0,3$  cm (STP) = 300 m-atm-cm oder 300 Dobson-Einheiten (DU). Dabei ist die Einheit DU definiert als 10<sup>-3</sup> cm Ozonschichtdicke bei Normaldruck und -temperaturverhältnissen. Diese Einheit wird im Forschungsbereich fast ausschließlich verwendet, ist aber nicht Teil einer internationalen Normung. Die Gesamtzongmessung beruht auf dem Bouguer-Lambert'schen Gesetz für monochromatische Strahlung:

$$\log I_\lambda = \log I_{0\lambda} - \alpha_\lambda \mu \Omega - \beta_\lambda m \frac{p}{p_0} \delta_\lambda m \quad (3)$$

Dabei sind:

$I_\lambda, I_{0\lambda}$	Intensitäten der Solarstrahlung der Wellenlänge $\lambda$ in Höhe des Instruments bzw. außerhalb der Erdatmosphäre;
$\alpha_\lambda$	Ozonabsorptions-Koeffizient (Funktion von $\lambda$ ),
$\beta_\lambda, \delta_\lambda$	sind Koeffizienten der molekularen (Rayleigh-) beziehungsweise der Aerosolstreuung,
$\mu$	Verhältnis der tatsächlichen zur senkrecht einfallenden Sonnenstrahlung durch die Ozonschicht,
$m$	optische Weglänge, längs der die molekulare Streuung in der sphärischen Atmosphäre erfolgt.

$m'$  relativ schräger Weg durch die Aerosolatmosphäre, ausgedrückt als  $\sec \xi$ , wobei  $\xi$  den solaren Zenitwinkel darstellt,

$p, p_0$  Luftdruck in Stationshöhe bzw. unter Normalbedingungen.

( $\mu, m$  und  $m'$  unterscheiden sich signifikant nur für Messungen mit hohen Zenitwinkeln aufgrund der Unterschiede in der vertikalen Verteilung von Ozon, Luftmolekülen und Aerosolteilchen).

In der Praxis ist es zweckmässig, gleichzeitig, wie oben beschrieben, in zwei benachbarten Wellenlängen zu messen, von denen eine sehr stark (Index 1) die andere nur schwach (Index 2) von Ozon absorbiert wird. In diesem Fall kann die Strahlungsdifferenz gemessen werden anstelle der absoluten Strahlung; dies ist natürlich viel einfacher. Es ergibt sich so:

$$\Omega = \frac{\log \frac{I_{01}}{I_{02}} - \log \frac{I_1}{I_2} - \frac{(\beta_1 - \beta_2)m \frac{p}{p_0}}{(\alpha_1 - \alpha_2) \mu} - \frac{(\delta_1 - \delta_2) \sec \xi}{(\alpha_1 - \alpha_2) \mu}}{\quad} \quad (4)$$

Der Term  $\log \frac{I_{01}}{I_{02}}$  ist die sog. extraterrestische Konstante.

Sie wird durch Mess-Serien direkter Sonnenbeobachtungen an Observatorien auf hohen Bergen, z. B. in Mauna Loa, bestimmt. Dabei wird angenommen, daß die dort vorhandenen UV-Strahlungsverhältnisse weitgehend gleich jenen außerhalb der Erdatmosphäre sind.

### 2 Dobson-Spektrophotometer

Dieses Meßgerät arbeitet nach dem oben genannten Meßprinzip, es ist Standardgerät im globalen Ozonbeobachtungssystem (GO<sub>3</sub>OS) mit rund 100 Stationen. Das Dobson-Spektrophotometer ist ein Doppelquarzprismamonochromator, der die Strahlung an jeweils zwei unterschiedlichen Wellenlängen mißt und vergleicht. Das Gerät wurde in seiner ursprünglichen Entwicklung von DOBSON (1931) beschrieben, im Laufe der Zeit kamen viele Verbesserungen der Optik und der elektronischen Teile hinzu. Eine ausführliche Beschreibung des Geräts, seiner Bedienung und seiner physikalischen Genauigkeit wurde von DOBSON (1977) und zuletzt im Rahmen eines WMO-Ozonprojekts von KOMHYR (1980) und von BASHER (1982) gegeben.

Die Gesamtzongmenge wird durch Bestimmung der relativen Intensität von ausgewählten Wellenlängenpaaren durch direkte Strahlungsmessung von der Sonne oder durch reflektierte Strahlung vom Zenit bzw. vom Mond bestimmt. Die meist benutzten Wellenlängen werden normalerweise mit A, C bzw. D bezeichnet. Das A-Wellenlängenpaar besteht aus der Wellenlänge 305,5 nm und 325,4 nm, das Wellenlängenpaar C aus 311,4 nm und 332,4 nm und das D-Paar setzt sich schließlich aus 317,6 und 325,4 nm zusammen. Bei allen Paaren wird die zuerst genannte Wellenlänge viel stärker durch Ozon absorbiert als die zweite.

Zum Beispiel wird beim A-Wellenlängenpaar 305,5 nm sehr stark von Ozon absorbiert, während die stärkere Strahlung (325,4 nm) nur wenig vom Ozon beeinflusst wird. Daraus er-

gibt sich eine große Differenz in den Ozonabsorptionskoeffizienten:  $(\alpha_1 - \alpha_2) \approx 1,748$ . Es wird angenommen, daß außerhalb der Erdatmosphäre diese relative Intensität der benutzten Wellenlängenpaare im wesentlichen konstant bleibt. Auf dem Weg durch die Atmosphäre zum Instrument wird weiter vorausgesetzt, daß, unabhängig von den unterschiedlichen Absorptionskoeffizienten des Ozons, beide Wellenlängen etwa die gleiche Strahlungsintensität durch Streuung an den Luftmolekülen verlieren.

Es gibt jedoch keine voll zufriedenstellende Methode, um die Größe der Streuung an den Aerosolen und Dunstteilchen der Atmosphäre festzustellen ( $\delta_1 - \delta_2$ ). Deshalb werden praktisch hauptsächlich Beobachtungen mit Doppelwellenlängenpaaren ausgeführt, z. B. die beiden Wellenlängenpaare A und D. Da beide Wellenlängenpaare etwa gleich stark durch die Atmosphäre abgeschwächt werden, kann der Aerosolstreuungseffekt so nahezu eliminiert werden. Dadurch bleibt die Absorption durch Ozon bei weitem der Hauptfaktor für die relative Intensität der gemessenen Doppellängenpaare. Die Gesamt ozonmenge kann auch durch Messung des gestreuten Lichts vom klaren Zenit oder leicht bewölkten Himmel bestimmt werden. Diese Zenitmessungen bedürfen aber einer Reduktion aufgrund empirischer Korrekturkarten, in die  $\Omega$  und  $\mu$  eingehen, sowie Geräterwerte von nahezu gleichzeitigen Messungen bei direkter Sonne und klarem Zenit. Jede Station sollte derartige Korrekturwerte entwickeln als Funktion unterschiedlicher Wolkenverhältnisse. Die Genauigkeit dieser Zenitwolkenmessungen ist dementsprechend schlechter als jene der direkten Messung in die Sonne.

Brennpunktebene des Instruments. Die erforderlichen Meßwellenlängen werden sehr scharf durch einen Doppelmonochromator (Schlitz  $S_2$ ,  $S_3$  und  $S_4$ ) im Bereich der Brennpunkte erzeugt. Die Wahl der Wellenlänge (A, C oder D) wird durch die Drehung zweier geschliffener Quarzplatten mit Hilfe entsprechenden Hebel Q1 und Q2 eingestellt. Ein optischer Keil dient zur Abschwächung der Strahlung der nur wenig durch Ozon absorbierten Wellenlänge. Die manuelle Verstellung des optischen Keils bis zur Nullanzeige eines Mikroamperemeters, das die Differenz der, mit einem Photomultiplier gemessenen Strahlungsenergien der beiden Wellenlängen anzeigt, gestattet die Bestimmung des relativen Strahlungsunterschieds und daraus die Berechnung des Gesamt ozongehalts  $\Omega$ . Die Benutzung dieses Nullausschlags macht das Spektrophotometer sehr weitgehend unabhängig von Änderungen der Empfindlichkeit des Photomultipliers oder des Verstärkers, aber sehr empfindlich gegen Änderungen der optischen Dichte des optischen Keils.

Das Dobson-Spektrophotometer ist das Standardinstrument für die Gesamt ozonmessung im  $GO_3OS$ , und es wird zusätzlich als Kalibrierungsbasis für andere Gesamt ozonmeßsysteme, einschließlich der Satelliten, benutzt. BASHER (1982) zeigte auf, daß infolge der Fehlerquellen dieses Geräts die Feststellung von Ozontrends auf etwa 0,7 bis 1,5% pro Jahr beschränkt ist. Dies hängt natürlich von der Meßgüte der Instrumente ab, deren Meßdaten zur Bestimmung des globalen Mittels verwendet wurden. Die Genauigkeit des Dobsoninstruments ist stark von der Güte seiner Kalibrierung und von der Sorgfalt bei der Messung abhängig. Diese Eigenschaften können natürlich im Laufe jahrelanger Beobachtungen stark

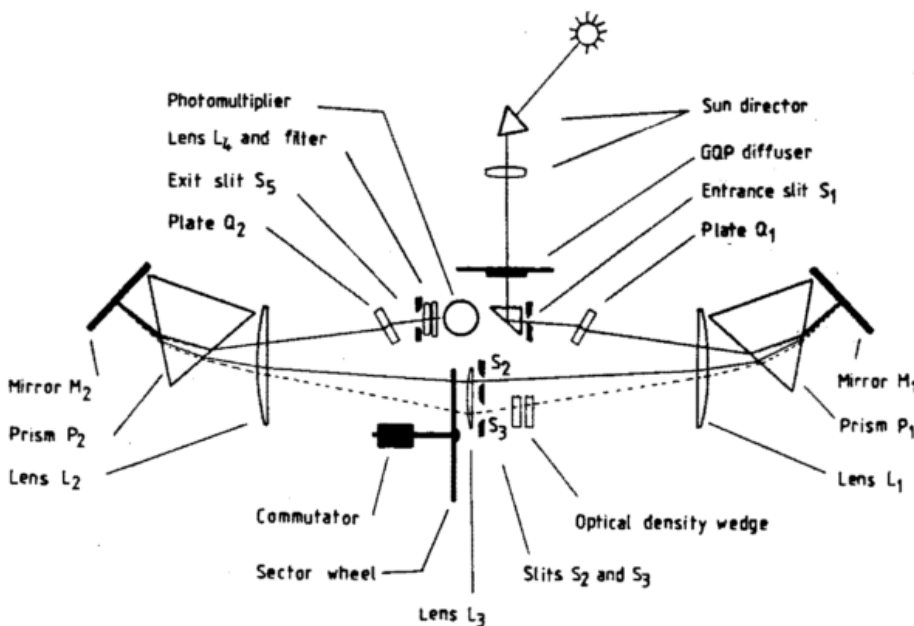


Abb. 1: Schematische Darstellung der wichtigsten optischen und mechanischen Teile des Dobson-Spektrophotometers (nach BASHER 1982).

Abbildung 1 zeigt das Meßprinzip des Dobson-Instruments. Das Sonnenlicht gelangt durch einen Prismenaufsatz in das Instrument auf Schlitz  $S_1$  des Spektroskops. Das Spektroskop besteht aus einer Quarzlinse, die das Licht parallel gestaltet, ein Prisma, welches es in die spektralen Komponenten zerlegt, einem Spiegel, der das Licht zurückreflektiert durch das Prisma, und die Linse zur Bildung eines Spektrums in der

variieren. BOJKOV und MATEER (1984) haben über drei Jahre die Meßergebnisse von TOMS-Satelliten über Dobson-Stationen mit Werten dieser Dobson-Messungen verglichen. Sie fanden, daß nach Eliminierung der permanenten Abweichung mehr als 72% aller Stationen zur Satellitenmessung nur Unterschiede von  $\pm 2\%$  aufweisen; dies ist sicher eine gute Kennung für sehr stabile Verhältnisse.

Die geschätzten Größenordnung verschiedener Meßfehler des Dobson-Spektrophotometers werden im WMO-Bericht Nr. 11 (Abschnitt 3.1.2) dargestellt. Einige wenige potentielle Unsicherheiten sollen hier genannt werden:

Die Berechnungen reagieren sehr intensiv auf die Genauigkeit der Ozonabsorptionskoeffizienten. Vor kurzem verbesserte Koeffizienten (1984) bedeuten eine Erniedrigung der bisherigen Berechnungen um etwa 3%.

Falsche Bestimmungen der extraterrestrischen Konstanten und deren mögliche Variation auf Grund solarer UV-Schwankungen. Beeinflussungen durch die Gegenwart von Spurengasen in der Atmosphäre wie  $\text{SO}_2$  und  $\text{NO}_2$ , die sich bei einigen Wellenlängen des Dobson bemerkbar machen. Abschwächung und Drift des optischen Keils. Mögliche, nichtlineare Variationen der Aerosolstreuung.

Routinemäßige Kalibrierung jedes Geräts und periodische internationale Vergleiche, angeregt und gefördert durch die Weltorganisation für Meteorologie während der letzten 10 Jahre, helfen mit, die Genauigkeitsabweichungen der Monatsmittel möglichst unter 2% zu halten um so ein gut funktionierendes  $\text{GO}_3\text{OS}$  zu gewährleisten.

### 3 Filter-Ozonmeter (M-83)

Seit 1957 werden in der USSR 40 routinemäßige Gesamt-ozonmeßgeräte nach dem Filterprinzip eingesetzt. Das M-83 benützt zwei Breitbandfilter für Messungen der Abschwächung der Ultraviolett-Strahlung bei direkter Sonne oder Zenithimmel (GUSTIN 1963).

Direkte Vergleiche mit dem Dobson-Spektrophotometer (s. BOJKOV 1969) ergaben bis 1971, daß M-83-Geräte etwa 6% weniger Ozon anzeigen, so lange die Beobachtungen bei  $\mu = 1,5$  liegen, und 20–30% mehr Ozon als die Dobson-Spektrophotometer, wenn die Beobachtungen bei  $\mu > 2$  gemacht werden. Eine starke Dunst- und Trübungsabhängigkeit wurde ebenfalls gefunden (9–14% höhere Ozonwerte als die Dobsonmessungen bei Sichtverhältnissen unterhalb 5 km). Ab 1972/73 erhielten die M-83-Instrumente verbesserte Filter (GUSTIN 1978). Die neuen Filter haben eine maximale Durchlässigkeit bei 301 und 326 nm und ihre Bandbreite konnte im Vergleich zu den früheren Versionen auf 22 nm (290–312) bzw. 15 nm (319–334 nm) begrenzt werden. Vergleiche mit den Nimbus-4/BUV Überflügen zeigen, daß während der ganzen Lebensdauer dieses Satelliten die Abweichungen bei den Dobson-Stationen weitgehend konstant bei 17 DU lagen. Die Standardabweichungen für die M-83 Stationen wechselten aber von etwa 50 DU vor 1973 auf 25 DU nachher. Daraus ergibt sich eine eindeutige Aussage für die positive Auswirkung der verbesserten Filter. Das russische Gesamtzonnetz sieht für jede M-83 Station eine Rekalibrierung mit Hilfe eines Dobson-Spektrophotometers im Zweijahreszyklus vor. Die Analysen dieser Daten im Rahmen des WMO-Ozonprojekts (Report Nr. 9) zeigen jedoch, daß die mittlere Abweichung zur Dobson-Messung weiterhin etwa 6% beträgt, mit stark variierenden Tageswerten bis zu 30% Differenz. Diese Fehler liegen, wie bereits erwähnt, in der starken Abhängigkeit vom solaren Zenitwinkel, von Bewölkung und Dunst. Sie werden hauptsächlich verursacht durch die Verschiebung der effektiven zentralen Wellenlänge der Filter als Funktion des Sonnenzenitwinkels (und den daraus

sich ergebenden Veränderungen des Ozonabsorptionskoeffizienten). Die potentielle Genauigkeit wird vom Hersteller mit 5% angegeben.

### 4 Brewer-Gitter-Spektrophotometer

Wesentliche Verbesserungen der Gesamt-ozonmessungen durch moderne optische und elektronische Möglichkeiten wurden von BREWER (1973) vorgeschlagen. Sie greifen auf eine Entwicklung zurück, die in Oxford durch WARDLE et. al. (1963) begonnen wurde. Ihr liegt das Prinzip des Gitter-Spektrographen, der ursprünglich von EHBERT konstruiert wurde, zugrunde. Das Gerät besitzt ein Beugungsgitter mit 1200 Linien pro mm und 5 Schlitze, den 5 ausgewählte Wellenlängen entsprechen, im Spektralbereich von 306 bis 320 nm und einer Auflösung von 0,6 nm (die Dobson-Spektralauflösung beträgt 0,9 – 1,5 nm). Das Meßprinzip des Brewer-Instruments wird in Abbildung 2 wiedergegeben. Das Instrument mißt die absolute Lichtintensität aller 5 Wellenlängen. Die Strahlungsintensitäten werden durch ein Pulszählsystem gemessen, das die Notwendigkeit aufwendiger optischer Teile überflüssig macht. Die automatische Wellenlängenkalibrierung erfolgt durch eine eingebaute Quecksilberlampe, ein Mikroprozessor kontrolliert den Kalibriervorgang. Die Überwachung der spektralen Einstellung des Spektrophotometers übernimmt eine sehr gut regulierte „Halogen-Standardlampe“. Durch die Benutzung eines polarisierten Prismas werden ausreichend gute Beobachtungen bei klarem Zenithimmel möglich, so daß empirische Korrekturkarten nicht mehr notwendig sind.

Die Meßdaten werden automatisch gespeichert, mögliche Fehler in der Messung und Bearbeitung der Daten werden durch eine Kontrolle des Mikroprozessors auf ein Minimum gebracht. Das Instrument arbeitet heute voll automatisch, es kann kontinuierlich eingesetzt werden. Vom Prinzip her ergeben sich so Daten für Umkehrberechnungen mit einem mini-

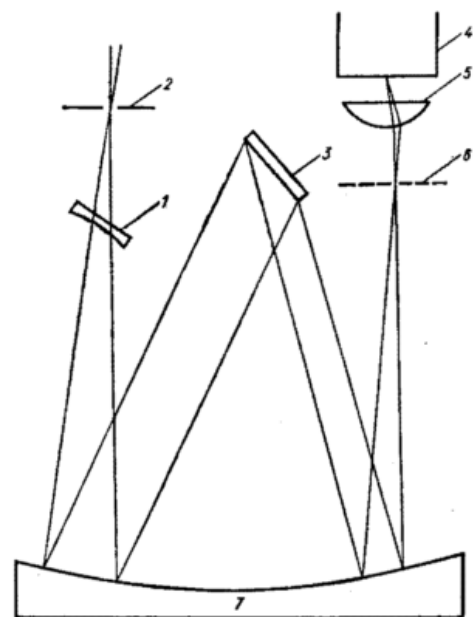


Abb. 2: Optisches Schema des Brewer Gitter-Spektrophotometers: 1 Korrekturlinsen, 2 Einlassspalt, 3 Beugungsgitter, 4 Photomultiplier, 5 Fabry-Linsen, 6 Ausgangsspalt, 7 Spiegel.

malen Arbeitsaufwand. Zusätzlich ist es möglich, durch eine bestimmte Kombination der Wellenlängenmessungen eine Aussage über den  $\text{SO}_2$ -Gehalt in der Meß-Säule zu erhalten. Dies ist äußerst nützlich zur erforderlichen Korrektur von Ozonmessungen in stark verschmutzter Luft.

Der Atmospheric Environment Service von Canada hat das Brewer-Ozonspektrophotometer weiter entwickelt und getestet für eine künftige zusätzliche Benutzung oder schließlich als Ersatz für den gegenwärtigen Standard-Dobson. Ergebnisse von Vergleichen in Toronto zeigen eine Differenz zwischen den Totalozonmeßdaten innerhalb von  $\pm 1\%$  bei direkter Sonnenbeobachtung. In letzter Zeit kamen jedoch Fragen über die Stabilität des Gerätes auf (KÖHLER et al. 1984). Bis heute sind keine weltweiten Einsätze des Brewer-Instruments vorgesehen, bis einige Instrumententests an unterschiedlichen geographischen Orten entsprechend dem Vorschlag der Ozonkommission der IAMAP fertiggestellt und kritisch bewertet sind.

### 5 Einige wesentliche Punkte der Gesamtozonverteilung

Obwohl ein paar sehr frühe Beobachtungen des Gesamtozons bis in das Jahr 1913 zurückreichen und regelmäßige Dobson-Spektrophotometermessungen in Arosa, Oxford und Tromsø in den späten 20er Jahren begannen, war es bis zum Internationalen Geophysikalischen Jahr (1957/1958) nicht möglich, ausreichende Meßwerte zu erhalten, um eine globale Analyse der Gesamt-Ozonverteilung zu versuchen. Die sehr unterschiedliche geographische Verteilung der Ozonmeß-Stationen verursacht einen räumlichen Fehler, der so weit als möglich bei den Analysen berücksichtigt werden muß.

Abbildung 3 zeigt die mittlere Verteilung des Gesamtozons über der Erde für die Jahre 1957 bis 1965 (BOJKOV 1967). Die wichtigsten Ergebnisse: Ein ausgeprägtes Minimum über

dem äquatorialen Gürtel, Ozonzunahme zu den Polen mit einem Maximum über den nördlichen mittleren und polaren Breiten und einem zweiten Maximum über den südlichen mittleren (aber nicht polaren) Breiten; dies wurde in späteren Jahren von Satellitendaten bestätigt. Einige wichtige, quasi permanente Merkmale sollen näher vorgestellt werden:

Der Gürtel minimaler Ozonwerte ( $> 240$  DU) liegt zwischen  $10^\circ$  Süd und  $15^\circ$  Nord und die tiefsten Ozonwerte treten dominierend auf der nördlichen Hemisphäre der Äquatorialregion auf.

Insgesamt nimmt das Gesamtozon mit der Breite zu, aber die Zunahme ist in den beiden Hemisphären nicht symmetrisch.

Der Ozongradient ist am stärksten zwischen  $30^\circ$  und  $50^\circ$ , pol- und äquatorwärts abnehmend; es gibt ausgeprägte Inhomogenitäten, angezeigt durch Ozonkeile über den östlichen Teilen der Kontinente, Ausdruck der klimatologischen Besonderheiten der planetarischen Zirkulationswellen.

Die Ozonmenge über der Antarktik ist geringer als über der Arktik: ein Ergebnis der unterschiedlichen Verteilung und des Verhaltens der zwei zirkumpolaren Zirkulationswirbel.

Abbildung 4 zeigt die mittlere Verteilung des Gesamtozons als Funktion der geographischen Längen und der Monate für die gleiche Periode (BOJKOV 1967). Die sehr unterschiedlichen Änderungen über den mittleren und polaren Breiten als Funktion der Jahreszeiten sind deutlich erkennbar. Sie erreichen nahezu 50% vom frühen Sommer bis zum Hochwinter. Der Ozongradient ist am kleinsten zwischen Juli und Oktober in der Nordhemisphäre und zwischen Februar und April in der Südhemisphäre. Dieser Gradient erreicht die höchsten Werte im Februar und März bzw. im November. Die Ozon-

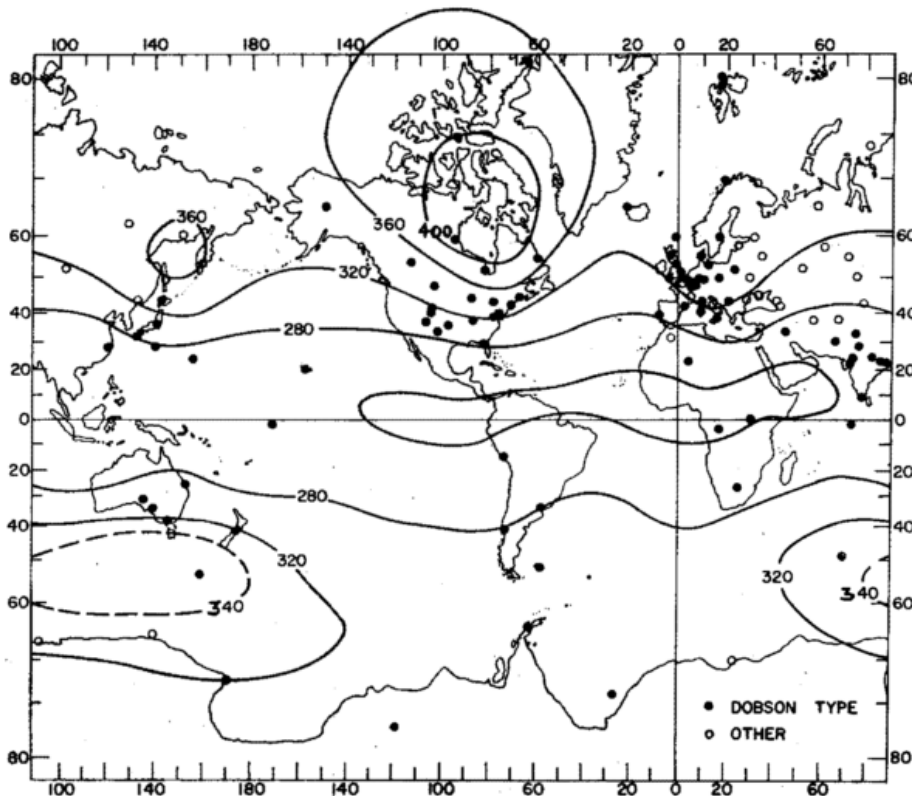


Abb. 3: Globale Gesamtozonverteilung aufgrund der Dobson- (●) und Filterinstrumente (○). Daten für den Zeitraum 1957–1966. (Die unterschiedlichen Gradienten und die längen- und breitenabhängigen Inhomogenitäten über den zwei Hemisphären wurden von Satellitenmessungen jetzt bestätigt).

zunahme in der Nordhemisphäre beginnt vor Ende der Polarnacht (Dez. bis Jan.); verglichen mit der Südhemisphäre bedeutet dies eine Verzögerung um ein bis zwei Monate im Jahreszeitenverlauf dort.

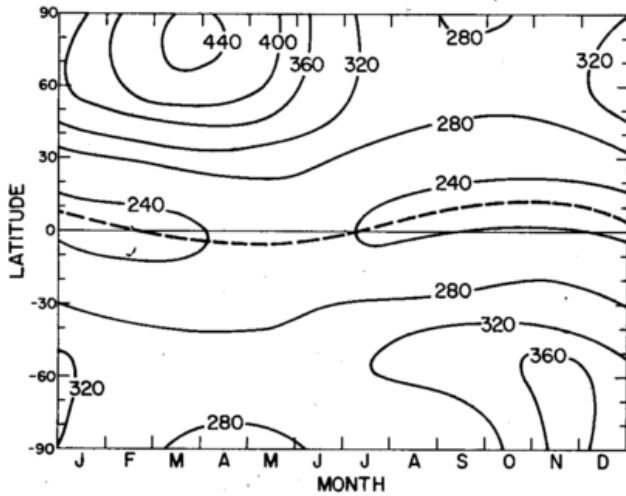


Abb. 4: Mittlere Meridionalverteilung des Gesamtzons für jeden Monat und auf der rechten Seite des Gesamtzons von Pol zu Pol für die Jahre 1957–1966. (Beachte die grundlegenden Unterschiede der Absolutwerte und die zeitliche Verzögerung bei Beginn der Ozonzunahme über der Südhemisphäre).

Die starke Zunahme des Gesamtzons während des Winters und des Frühjahrs, der Rückgang im Sommer bis zum Jahresminimum im Herbst, wie er für die mittleren und polaren Breiten typisch ist, wird in Abbildung 5 an den Gesamtzonsmessungen des Observatoriums Hohenpeissenberg während der letzten 18 Jahre dargestellt. Die vertikalen Balken repräsentieren die Zweisigmagrenze der monatlichen Mittel, sie zeigen eine wesentliche größere Variabilität in den Winter- und Frühlingsmonaten.

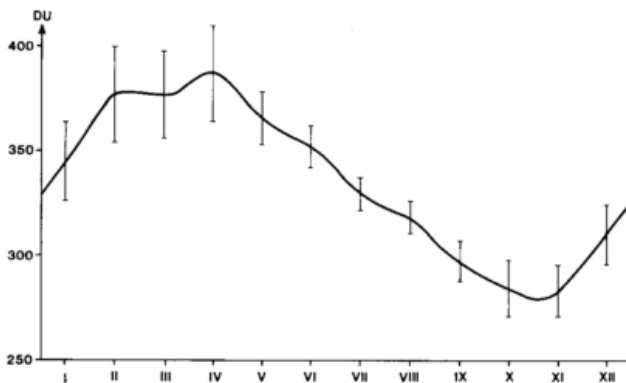


Abb. 5: Der jährliche Gang des Gesamtzons über Hohenpeissenberg für die Jahre 1967–1985. Die vertikalen Balken stellen die 2- $\sigma$ -Standardabweichung der Monatsmittel dar. Sie zeigen eine doppelt so große Variabilität während des Winters und Frühjahrs im Vergleich zum Sommer und Herbst.

### Literatur

BASHER, R. E.: Review of the Dobson spectrophotometer and its accuracy. WMO Ozone Report Nr. 13 (1982) 94pp.  
 BOJKOV, R. D.: Global total ozone distribution (1957/65). NCAR manuscript presented at Ozone Symposium in Monaco 1968.

BOJKOV, R. D.: Differences in Dobson spectrophotometer and filter ozonmeter measurements of total ozone. J. Appl. Meteorol. 9 (1969) S. 362–368.

BOJKOV, R. D.; MATEER C. L.: On the relative quality performance of GO<sub>3</sub>OS — total ozone measurements. Proc. Ozone Symposium Halkidiki. VD. Reidel Publ. Co. (1984) S. 335–340.

BREWER, A. W.: A replacement for the Dobson spectrophotometer. Pure and Appl. Geophys. 106–108 (1973) 919–927.

DOBSON, G. M. B.: A photoelectric spectrophotometer for measuring the amount of atmospheric ozone. Proc. Phys. Soc. London 43 (1931) S. 324–339.

DOBSON, G. M. B.: Observers' handbook für the ozone spectrophotometer. Annals of the IGY, V, Pt. I (1967) S. 46–89.

FABRY, C.; BUISSON, H.: L'absorption de l'ultraviolet par l'ozone et la limite du spectre solaire. J. Phys. Paris, Ser. 5, 3 (1913) S. 196.

GUSTIN, G. P.: Universal ozonometer. Proc. Main Geophys. Obs. Leningrad 141 (1963) S. 83–98.

GUSTIN, G. P.: On the methodology of total ozone measurements in the global network. Proc. Main Geophys. Obs. Leningrad 406 (1978) S. 63–75.

KÖHLER, U.; HARTMANNGRUBER, R.; ATTMANNSPACHER, W.: Experiences with a Brewer spectrophotometer and intercomparison with a Dobson spectrophotometer. Proc. Ozone Symposium Halkidiki VD. Reidel Publ. Co (1984) S. 402–406.

KOMHYR, W. D.: Operations handbook-ozone observations with Dobson spectrophotometer. WMO Ozone Report Nr. 6 (1980).

WARDLE, D. J.; WALSHAW, C. D.; WORMELL, T. W.: A new instrument for atmospheric ozone. Nature 199 (1963) S. 1177–78.

# Dobson-Spektrophotometer 104 — Brewer-Spektrophotometer 10

## Ein Langzeitvergleich am Meteorologischen Observatorium Hohenpeißenberg

### 1 Einleitung

Der Totalozongehalt der Atmosphäre wird seit über 50 Jahren mit dem Dobson-Spektrophotometer gemessen, dessen theoretische Grundlagen vor etwa 60 Jahren gelegt wurden (DOBSON u. HARRISON 1926) und das kurz darauf in seinen ersten Exemplaren Form gewann (DOBSON 1931). Im Laufe der letzten beiden Jahrzehnte stellte sich jedoch mehr und mehr heraus, daß der Dobson trotz etlicher Verbesserungen (Verwendung moderner Elektronik und Optik, Automatisierungsversuche) vom konstruktiven Konzept her an seine Grenzen gelangt war. Seine prinzipiellen Nachteile sind:

- Unhandlichkeit aufgrund seiner Ausmaße
- Lange Dauer einer Einzelmessung
- Keine gleichzeitigen Messungen in den verwendeten Wellenlängen möglich
- Zeitaufwendige Tests und Wartung
- Einfluß anderer Spurengase (z. B.  $\text{SO}_2$ ) auf die Messung
- Vollautomatisierung schwer möglich.

Diese Erkenntnis führte schon in den 60er Jahren (WARDLE, WALSHAW u. WORMELL 1963) zu Vorarbeiten für ein neues Spektrophotometer, die schließlich unter der Leitung von A. W. BREWER und D. J. WARDLE anfangs der 70er Jahre die Entwicklung des sogenannten Brewer-Spektrophotometers ermöglichten.

Eine einführende Beschreibung des Aufbaus, der Meßprinzipien sowie der Unterschiede beider Spektrophotometer gibt R. BOJKOV im Beitrag 2 dieses Heftes. Außerdem wird auch die Totalozonmeßgröße Dobson-Einheit (DU) erklärt. In den letzten Jahren wurden von verschiedenen Gruppen Vergleiche der verschiedenen alten und neu entwickelten Ozonometern durchgeführt (MATTHEWS 1972; MÜLLER u. REITER 1980; PARSONS et. al. 1982), um die Qualitäten der neuen Meßgeräte im Verhältnis zum Standardgerät Dobson zu testen.

Seit Januar 1983 befindet sich das Brewer-Spektrophotometer 10 im Rahmen eines vom Ministerium für Forschung und Technologie finanzierten Projekts am Meteorologischen Observatorium Hohenpeißenberg (MOHP). Ein Vergleich mit dem seit 1967 am MOHP eingesetzten Dobson 104 soll Aufschluß darüber geben, ob das Brewer-Spektrophotometer dazu geeignet ist, eine Ergänzung zum Dobson und in absehbarer Zeit sogar ein Ersatz für das veraltete Standardgerät zu sein. Die Ergebnisse dieses Langzeitvergleiches werden für den Zeitraum Januar 1983 bis Februar 1985 im folgenden vorgestellt (s. auch KÖHLER et al. 1985).

### 2 Datengewinnung

Beide Spektrophotometer messen auf dem Balkon im 7. Stock des 30 m hohen Turms des MOHP. Dieser ist nach Südwesten orientiert, so daß die Instrumente das ganze Jahr über, außer

im Hochsommer kurz nach Sonnenaufgang, freien Blick zur Sonne haben.

Die Rohmeßwerte des Dobsons werden manuell in einen Kleinrechner eingegeben, von diesem in Totalozonwerte umgerechnet, ausgedruckt und auf Diskette gespeichert. Jeden Monat werden die Ergebnisse auf Formblättern zum Atmospheric Environment Service (AES) in Toronto (Kanada) gesandt, um in den „Ozone Data for the World“ veröffentlicht zu werden, die alle zwei Monate erscheinen. Im Deutschen Wetterdienst werden sie halbjährlich in den „Sonderbeobachtungen des Meteorologischen Observatoriums Hohenpeißenberg“ veröffentlicht. Die Brewermeßwerte werden direkt von dessen Kontrollrechner erfaßt, in Ozonwerte umgerechnet, diese ausgedruckt und auf Diskette gespeichert.

Für den Vergleich werden nur Messungen beider Instrumente herangezogen, die folgende Bedingungen erfüllen:

- a) Zeitliche Differenz kleiner als 15 Minuten, da die natürlichen Variationen des Totalozons bis zu 10 DU innerhalb von 30 Minuten betragen können.
- b) Die Standardabweichung des aus 5 Einzelmessungen bestehenden Brewer-Ozonwertes soll kleiner als 2.5 DU sein (zeigt eine nicht durch Bewölkung oder Meßfehler gestörte Messung an).

Nach Anwendung dieser Kriterien standen 393 simultane Messungen an 175 Tagen für einen Vergleich zur Verfügung. Tägliche Lampentests beim Brewer und monatliche beim Dobson mit jeweils zwei verschiedenen Lampen dienten zur Überprüfung beider Instrumente. Die Quecksilberlampentests stellten sicher, daß in den richtigen Wellenlängen gemessen wurde. Tests mit Halogenlampen, sogenannten Standardlampen, ergaben Aufschluß über die Stabilität der spektralen Empfindlichkeit der Geräte und konnten, wenn nötig, zu Korrekturen der Gerätekonstanten herangezogen werden.

### 3 Ergebnisse

In den ersten drei Monaten stimmten Dobson und Brewer sehr gut überein (s. Abb. 1). Die Monatsmittelwerte der relativen Differenz  $X_{\text{rel}} = (X_{\text{Brewer}} - X_{\text{Dobson}}) / X_{\text{Brewer}} \cdot 100$  lagen zwischen  $-0.41\%$  im Februar und  $0.36\%$  im März 1983. Das entspricht absoluten Differenzen  $X_{\text{abs}} = (X_{\text{Brewer}} - X_{\text{Dobson}})$  von  $-1.4$  DU bzw.  $1.1$  DU. Die kleinste Standardabweichung der Monatsmittel betrug  $0.28\%$  ( $\pm 0.9$  DU) im März, die größte  $0.88\%$  ( $\pm 2.7$  DU) im Januar 1983. Das ist ein hervorragendes Ergebnis auch im Bezug auf andere Vergleiche (PARSONS et al. 1982; MÜLLER u. REITER 1980).

Die Differenz zwischen beiden Geräten wurde jedoch in den folgenden Monaten immer größer und erreichte im Juli/August 1983 mehr als  $-15$  DU ( $> -5\%$ ). Als Verursacher die-

ses Trends stellte sich der Brewer heraus, dessen Standardlampentests seit April eine deutliche Drift der spektralen Empfindlichkeit anzeigten. Daraufhin wurde der Brewer bei AES bzw. Sci-Tec (Herstellerfirma) in Kanada von Anfang September bis Ende Oktober 1983 überprüft, repariert und neu kalibriert sowie das zum vollautomatischen Betrieb notwendige Sonnennachführsystem (Suntracker) installiert.

Die danach fortgesetzten Vergleichsmessungen zeigten, daß der Brewer von November 1983 bis April 1984 um etwa 1.5% bis 3.5% höhere Werte lieferte als der Dobson. Im Vergleich zum Zeitraum Januar bis März 1983 sind das etwa 4% Unterschied. Eine Erklärung dafür sind die zwei Kalibrierungen des Brewers, die mit verschiedenen Standardgeräten vorgenommen wurden. Die 1. Kalibrierung im Herbst 1982 erfolgte mit dem auf Mauna Loa nach der sogenannten Langley-Methode direkt und absolut geeichten Brewer 1. Bei der 2. Eichung im Herbst 1983 in Toronto waren als Standardgerät der Brewer 8 bzw. der Dobson 77 im Einsatz. Bei Vergleichen sowohl von absolut geeichten Brewer- und Dobsonstandards als auch von Satelliten- und Dobsonmessungen hatte sich in den letzten Jahren herausgestellt, daß der Dobson mit großer Wahrscheinlichkeit wegen unsicherer Absorptionskoeffizienten etwa 3.9% zuviel Totalozon mißt. Um bis zu einer endgültigen Klärung und eventuellen Neufestlegung der Absorptionskoeffizienten des Ozons in den Dobsonwellenlängen Übereinstimmung zwischen den Brewer- und Dobsonmessungen zu erzielen, wurde eine vorläufige Anhebung der Brewermeßwerte um 3.9% vorgenommen.

tel) von November bis Ende Dezember 1983 und eine darauf folgende Zunahme bis März 1984. Im November bzw. Februar/März werden im Durchschnitt bei höherem Sonnenstand Totalozonmessungen durchgeführt als im Dezember/Januar. Die Falscheichung eines Gerätes verursacht einen Meßfehler, der abhängig ist vom Sonnenstand, und zwar: Je kleiner der Zenitwinkel der Sonne, desto größer ist der Meßfehler. Daher ist die Abweichung des Brewers vom Dobson zur Jahreswende am kleinsten.

Die Standardlampentests (SL-Tests) in diesem Zeitraum stützen diese Erklärung, da der Brewer während dieser Zeit sehr stabil war und daher dieser Trend nicht durch eine Drift der spektralen Empfindlichkeit bewirkt wurde. Ab April 1984 jedoch liefen die SL-Testwerte des Brewers erneut weg, was sich auch in einer überproportionalen Zunahme der Differenzen niederschlägt. In den Monaten Juni/Juli 1984 wurde bis über 7% erreicht.

Eine erste Korrektur aufgrund der SL-Testwerte Mitte Juli und anschließend eine reguläre Kalibrierung mit dem kanadischen Standard-Brewer 17, der sich Ende August 1984 am Hohenpeißenberg befand, brachten den Brewer 10 wieder in seinen ursprünglichen Zustand. Zwar ist jetzt die Symmetrie der Differenzen zum Jahreswechsel schwerlich erkennbar, was aber durch eine im Dezember neuerlich beginnende Drift des SL-Tests des Brewers erklärbar ist, die sich auch über den Februar 1985 hinaus fortsetzte.

Für den Hohenpeißenberg war dieser lange Vergleichszeitraum eine günstige Gelegenheit, die Meßgenauigkeit des

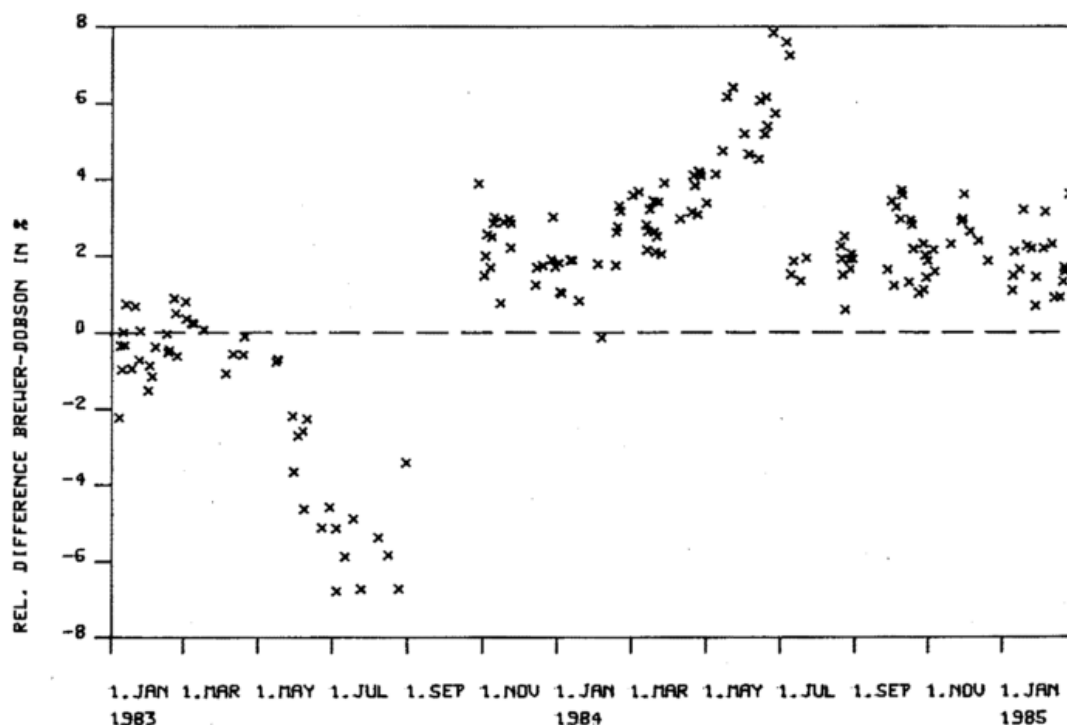


Abb. 1: Tagesmittel der relativen Differenz des Total-Ozons zwischen Brewer und Dobson.

Diese bewußte Falschmessung des Brewers ist anscheinend auch die Ursache des symmetrischen Verhaltens der Brewer-Dobson-Differenz zur Wintersonnenwende. In Abbildung 1 sieht man eine Abnahme der relativen Differenzen (Tagesmit-

Dobson 104 zu überprüfen. Zieht man dafür nur die Zeiträume heran, in denen der Brewer 10 nach dem Dobsonstandard geeicht und außerdem stabil war (November 83 — März 84, August — November 85), erkennt man (s. Abb. 1), daß der

Brewer 10 im Mittel etwa 2.5% höhere Meßwerte lieferte als der Dobson 104. Dies stimmt sehr gut mit Satellitenvergleichsdaten von 1979–1982 (FLEIG et al. 1983) überein. Vermutlich bestand diese Fehlmessung des Dobson 104 seit dem letzten internationalen Dobsonvergleich 1978 in Arosa (Schweiz). Aufgrund von Unstimmigkeiten zwischen den beiden dort anwesenden Standard-Dobsons war dieser nicht ganz erfolgreich verlaufen. Da ein neuerlicher Dobsonvergleich schon längere Zeit überfällig ist (Empfehlung der WMO: 4-Jahres-Turnus), wurde der Dobson 104 mit Hilfe der Brewer-17-Vergleichsmessungen und einer neuen Kalibrierungsmethode (s. KERR et al. 1985) geeicht und dürfte daher seit März 1985 recht gut dem Dobsonstandard entsprechen.

Ein gutes Beispiel für die Güte dieser Neueichung ist in den Abbildungen 2a und 2b zu sehen. Abbildung 2a zeigt die Originalmessungen von Dobson und Brewer am 29. 08. 1984, Abbildung 2b die Totalozonwerte, die mit Hilfe der Neukalibrierungen (mit Brewer 17) Neuberechnet wurden. Deutlich ist in Abbildung 2a sowohl die mittlere Differenz von absolut etwa 7 DU (entspricht einer relativen Differenz von etwas mehr als 2%) als auch die Tageszeitabhängigkeit zu sehen. Diese wird durch die Abhängigkeit der Differenzen vom Sonnenstand verursacht. In Abbildung 2b liegen die Messungen beider Instrumente dicht beieinander; die relativen Abweichungen liegen deutlich unter 1%, was in etwa der Meßgenauigkeit eines gut geeichten Dobsons entspricht.

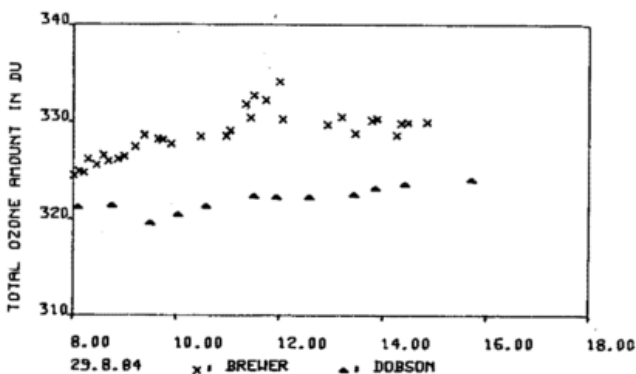


Abb. 2a: Einzelmessungen des Total-Ozons am 29. 08. 1984. Originaldaten. Uhrzeit ist MEZ.

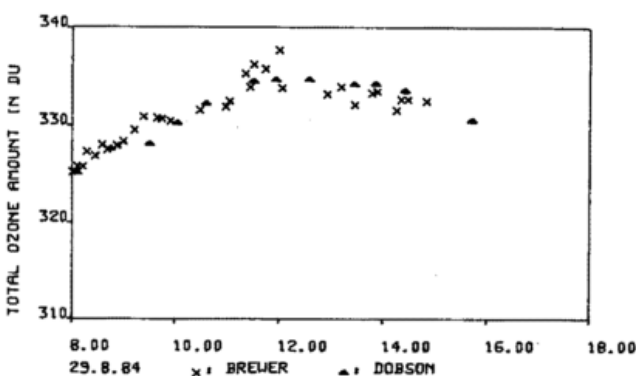


Abb. 2b: Einzelmessungen des Total-Ozons am 29. 08. 1984. Neuberechnete Daten. Uhrzeit ist MEZ.

#### 4 Schlußfolgerungen

Das neu entwickelte Brewer-Spektrophotometer zeichnet sich gegenüber dem Standardgerät in einigen wichtigen Punkten aus. Diese sind:

- handliche Dimensionen
- nahezu simultane Messungen in allen Wellenlängen
- kürzerer Meßzyklus mit bedeutend mehr Einzelmessungen und daher:
- höhere Meßgenauigkeit
- Gerätetests sind einfacher und daher öfter durchführbar
- Vollautomatisierung möglich.

Einige Punkte trüben jedoch das im allgemeinen recht gute Gesamtbild:

- Defekte und Instabilitäten von Optik und Elektronik beeinträchtigen die Messungen zumindest des Brewer 10.
- Zum jetzigen Zeitpunkt ist es nicht so leicht wie beim Dobson, Fehler zu finden und zu beheben.

Nach grundsätzlicher Behebung dieser Schwächen ist der Brewer aufgrund seines konstruktiven Konzepts sicher eine Alternative zum Dobson im Totalozonmeßnetz und könnte ihn in absehbarer Zukunft ersetzen.

Die Dobson-104-Messungen am MOHP waren in den letzten Jahren mit einem Fehler von durchschnittlich  $-2.5\%$  behaftet. Dieser dürfte durch die Neueichung weitgehend beseitigt sein, war aber keineswegs eine Überprüfung und eventuelle Justierung der optischen Bauteile ersetzen kann; nur so ist eine optimale Kalibrierung möglich.

Die Vergleichsmessungen mit dem Brewer 10 wurden auch nach Februar 1985 fortgesetzt, um weitere Aufschlüsse über die Verlässlichkeit beider Geräte zu erhalten.

#### Literatur

- DOBSON, G. M. B.; HARRISON, D. N.: Measurements of the amount of ozone in the Earth's atmosphere and its relation to other geophysical conditions. Proc. Roy. Soc. London A 110 (1926) S. 660–693.
- DOBSON, G. M. B.: A photoelectric spectrophotometer for measuring the amount of atmospheric ozone. Proc. Phys. Soc. 43 (1931) S. 324–339.
- FLEIG, A. J.; BHARTIA, P. K.; KLENK, K. F.; WONG, C. K.; MATEER, C. L.: Comparison of NIMBUS 7 TOMS and Ground Station Total Ozone Measurements. In: "Ozone Data for the World", Catalogue of Ozone Stations and Catalogue of Ozone Data for 1980–1982, Index No. 17 (1983).
- KERR, J. B.; EVANS, W. F. J.; ASBRIDGE, J. A.: Recalibration of Dobson Field Spectrophotometers with a travelling Brewer Spectrophotometer Standard. In: Atmospheric Ozone, Proceedings of the Quadrennial Ozone Symposium 1984 in Greece (1985).
- KÖHLER, U.; HARTMANNGRUBER, R.; ATTMANNPACHER, W.: Experiences with a Brewer Spectrophotometer and intercomparison measurements with a Dobson Spectrophotometer. In: Atmospheric Ozone, Proceedings of the Quadrennial Ozone Symposium 1984 in Greece (1985).

MATTHEWS, W. A.: Agreement between Dobson Spectrophotometer and Filter Ozonometer measurements of total ozone. *J. of Appl. Meteorol.* 11 (1972) S. 239–241.

MÜLLER, H.; REITER, R.: Intercomparison of New Zealand Filter Ozonometer and Dobson Spectrophotometer total ozone measurement. *Pure and Appl. Geophys.* 118 (1980) S. 847–857.

PARSONS, C. L.; GERLACH, J. C.; WILLIAMS, M. E.: An intercomparison of groundbased total ozone instruments. *J. of Appl. Meteorol.* 21 (1982) S. 708–724.

WARDLE, D. J.; WALSHAW, C. D.; WORMELL, T. W.: A new instrument for atmospheric ozone. *Nature* 199 (1963) S. 1177–1178.

## 4 C. L. MATEER Satellitenmessungen des Gesamtozons

### 1 Einleitung

Eine große Anzahl von Instrumenten, eingebaut in unbemannten Erdsatelliten, wurde bereits geflogen, um das Gesamtozon der Atmosphäre zu messen. Diese Geräte können nach folgenden Gesichtspunkten klassifiziert werden:

- a) nach dem spektralen Bereich, in dem die Messungen liegen,
- b) nach der Art und Weise der Durchführung der Messung und nach der Methode der Berechnung der Meßergebnisse.

Die benutzten Spektralbereiche reichen vom Ultraviolett (310–340 nm) über den sichtbaren Bereich (Chappuis-Ozonbanden, in der Nähe von 600 nm) bis zu den Infrarot-Ozonbanden (9,6  $\mu\text{m}$ ). Die Meßstrecken gehen zum Teil nur zum Fußpunkt, andere Geräte tasten vom Nadir bis zu etwa 50° herauf, eine dritte Gruppe benutzt die Randabtastung. Die Auswertemethoden können dabei physikalisch oder empirisch fundiert sein.

Die wichtigsten Satellitenexperimente, die signifikante Gesamtozondaten erbrachten, sind folgende: Das „Backscattered Ultraviolet“ (BUV) Instrument im Nimbus 4, das von April 1970 bis Ende 1977 Meßdaten lieferte, das „Solar Backscattered Ultraviolet“ (SBUV) Instrument auf Nimbus 7, das seit Oktober 1978 bis heute in Betrieb ist, das „Total Ozone Mapping Spectrometer“ (TOMS) Instrument, das mit SBUV auf Nimbus 7 arbeitet, sowie das „Solar Backscattered Ultraviolet/2“ (SBUV/2) Instrument auf dem NOAA-9-Satelliten. Dieser Satellit wurde im Dezember 1984 gestartet, sein SBUV/2-Gerät ist seit dem 26. 03. 1985 in Betrieb. Das „Multichannel Filter Radiometer“ (MFR), ein Infrarot-Instrument, wurde im Rahmen des „USAF Defense Meteorological Satellite Program“ (DMSP) geflogen. Es lieferte Gesamtozonergebnisse von März 1977 bis einschließlich Januar 1980. Der „TIROS Operational Vertical Sounder“ (TOVS) auf dem TIROS-N NOAA-Satelliten liefert Ozondaten seit Mitte 1979. Das „Stratospheric Aerosol and Gas Experiment“ (SAGE) Instrument wurde am 18. Februar 1979 auf dem Explorer-Satelliten (AEM-2) gestartet und lieferte 34 Monate lang Daten.

Satelliten-Meßsysteme bieten verschiedene ausgeprägte Vorteile gegenüber den traditionellen Bodenmeßsystemen, wie z. B. dem Dobson-Ozon-Spektrophotometer:

In einem Satelliten-System macht ein und dasselbe Instrument alle Messungen, es gibt keinerlei Probleme bezüglich unterschiedlicher Geräte von einer Station zur anderen. Des Weiteren sind die Beobachtungen über einen großen Teil der Erde verteilt und beziehen sich nicht nur auf einige Punkte. So können z. B. pro Tag 180 000 TOMS-Beobachtungen des Gesamtozons mit dem Dobson-Netz von 60–70 Stationen verglichen werden. Die Satelliten-Systeme sind jedoch nicht perfekt. Die BUV-Geräte kranken an einer graduellen Abnutzung. Die SAGE-Typen ermöglichen nur begrenzte Messungen in Raum und Zeit.

Das TOVS-System benötigt die statistische Regression der Satellitenmessung mit den Bodenbeobachtungen des Dobson-Netzes, um die für die Berechnung erforderlichen Koeffizienten zu erhalten; d.h. TOVS-Geräte können nicht unabhängig von dem Beobachtungsnetz am Boden arbeiten, es sei denn, eine „physikalische“ anstelle einer „empirischen“ Berechnungsmethode kann entwickelt werden.

In diesem Artikel sollen kurz die Prinzipien von drei Experimenten geschildert und eines davon näher betrachtet werden, nämlich die „Backscattered Ultraviolet“ (BUV) Methode.

### 2 Kurze Darstellung von drei Satelliten-Meßsystemen zur Bestimmung des Gesamtozons der Atmosphäre

#### 2.1 TIROS Operational Vertical Sounder (TOVS)

Dieses System wurde in erster Linie zur Abschätzung der vertikalen Temperatur und des Feuchtigkeitsprofils für den praktischen Wetterdienst entwickelt. Das TOVS besteht aus drei getrennten Instrumenten: dem hochauflösenden Infrarotfühler (HIRS/2, ein Infrarot-Radiometer), der stratosphärischen Meßeinheit (SSU, ebenfalls ein Infrarot-Radiometer) und dem Mikrowellen-Fühler (MSU, ein Mikrowellen-Radiometer). Insgesamt messen diese drei Instrumente 27 spektrale Kanäle. Diese ausgewählten Spektralbereiche sind für Ozon, Temperatur und Wasserdampf empfindlich. Das Gesamtozon kann aus 7 Kanälen berechnet werden, wenn diese Strahlung aus wolkenlosem Bereich gemessen wurde. Der wichtigste Ozonmeßfühler ist der Kanal 9,71  $\mu\text{m}$ , der aber von der Temperatur an der Erdoberfläche und in der Atmosphäre beeinflusst wird. Deshalb wird der Fensterbereich bei 11,11  $\mu\text{m}$  zur Korrektur des Effekts der Oberflächentemperatur benutzt, während 5 zusätzliche Kanäle benötigt werden,

um den atmosphärischen Temperatureffekt zu korrigieren. Natürlich ist das Instrumentenblickfeld nicht immer wolkenlos. Das TIROS-Berechnungssystem enthält deshalb einen besonderen Verbesserungsalgorithmus — den „TIROS Atmospheric Radiance Module“ (TARM) — der Verfälschungen durch einen Vergleich der Strahlung aus verschiedenen Bereichen abschätzt, und zwar aus 9 Messungen quer zur Flugbahn und 7 Messungen längs derselben. Etwa 20% der Zeit ist für eine Ozonberechnung zu stark bewölkt. Der TARM-Algorithmus ist ausführlich bei McMILLIN und DEAN (1982) beschrieben. Die TOVS-Gesamtozonberechnungstechnik benützt multiple Linearregressionen, wobei Dobson-Gesamtozonwerte des Dobson-Beobachtungsnetzes und die TOVS-Messungen bei wolkenlosem Meßfeld analysiert werden, um die Regressionskoeffizienten zu erhalten. Um diese Methode zu überprüfen, wird nur ein Teil des globalen Dobsonnetzes zur Bestimmung der Regressionskoeffizienten benutzt, der Rest wird zur Verifikation benötigt. Unterschiedliche Koeffizienten ergeben sich für die unterschiedlichen Breitenbereiche (30° Süd bis 30° Nord und 30 bis 60° Nord) sowie für die einzelnen Monate. Testuntersuchungen ergaben keine systematischen Unterschiede zwischen den TOVS- und den Dobson-Gesamtozonwerten, die Standardabweichung der Differenzen variiert für die verschiedenen Monate von etwa 15 bis 22 Dobson-Einheiten. Das Verfahren der TOVS-Messung wird ausführlich von PLANET, GROSBY, LIENESCH und HILL (1984) diskutiert.

## 2.2 Das Multichannel Filter Radiometer (MFR) System

Das MFR-Instrument mißt die nach oben gerichtete Infrarotstrahlung in 16 Kanälen und liefert so die wichtigsten Daten für die Bestimmung der Temperatur und des Wasserdampfes. Es wurde in 4°-Stufen quer zur Flugbahn abgetastet; Messungen an 25 Orten wurden bei jedem 32-Sekunden-Takt ausgeführt.

Die Gesamtozonmessungen wurden empirisch unter Verwendung einer linearen Regressionsanalyse mit Hilfe der Strahlungsübertragungstheorie sowie klimatologisch repräsentativen Ozon- und Temperaturprofilen berechnet. In der Regression wurde das Gesamtozon dargestellt aus einer linearen Kombination von 4 Größen, die sich aus 4 MFR-Strahlungsmessbereichen (Ozon 9,8  $\mu\text{m}$ , Fensterstrahlung 12,0  $\mu\text{m}$ , Temperatur 14,4 und 15,0  $\mu\text{m}$ ) und der Sekante des Nadirwinkels der Messung ableiten lassen. Es ist eine physikalisch/empirische Berechnungsmethode, da es keine direkte Regression zwischen Gesamtozon und Strahlung gibt.

Ein Vergleich der MFR- und Dobson-Gesamtozonmeßergebnisse von 36 Stationen vom 1. Januar bis 15. Februar 1979 ergab eine mittlere Differenz von 2,2% (Dobsonwerte höher) und eine mittlere RMS-Differenz von 7,2%. Nähere Angaben sind bei LUTHER und WEICHEL (1980) und LUTHER et al. (1980) vorhanden.

## 2.3 Das Stratosphärische Aerosol- und Gasexperiment (SAGE)

Das SAGE-Instrument ist ein 4-Kanal-Sonnenphotometer, mit dem Vertikalprofile der Aerosolextinktion, des Ozons und des Stickstoffdioxids während des Sonnenauf- und -untergangs erhalten werden. Das Gesamtozon wird durch das

Integral des vertikalen Ozonprofils bis herunter zur Wolkenoberfläche bestimmt; die Ozonmenge in der Troposphäre unterhalb der Wolkenobergrenze wird geschätzt und addiert. Dieses Experiment wird im Beitrag 8 (Heft 1/2 '87) über Ozonprofile aus Messungen von Satelliten näher beschrieben. Weiteres ist bei CHU und McCORMICK (1979) und McCORMICK et al. (1984) zu finden.

## 3 Gesamtozonmessungen aus dem Backscattered Ultraviolett-Experiment

### 3.1 Die Methode

Das Prinzip der BUV-Totalozon-Meßmethode wird schematisch in Abbildung 1 dargestellt. Es müssen zuerst Wellenlängenbereiche ausgewählt werden, die nur mäßig oder schwach von Ozon absorbiert werden. Die Strahlungsenergie einer solchen Bande ist dann auf dem Weg von der Sonne in die Troposphäre nur zum Teil absorbiert. In der Troposphäre, in der relativ wenig Ozon vorhanden ist, ist dann der Hauptprozeß Streuung und Reflexion an Wolken und an der Erdoberfläche (oder an Schnee). Diese gestreute und reflektierte Strahlung geht wieder nach oben durch die Ozonschicht, wobei natürlich zusätzliche Teilabsorption erfolgt, schließlich gelangt sie in das Satelliten-Spektrometer. Einfach dargestellt besteht dieses Experiment aus einer Lichtquelle, der Sonne oberhalb der Ozonschicht, einem Reflektor, der Troposphäre mit ihrer Streuung und Reflexion, der absorbierenden Ozonschicht dazwischen und dem Satelliten-Spektrometer darüber (oberhalb der Ozonschicht). Eine gerade außerhalb der Ozonabsorptionsbanden gelegene Spektrallinie wird benutzt, um die Rückstreuung und Reflexion in der Troposphäre zu messen.

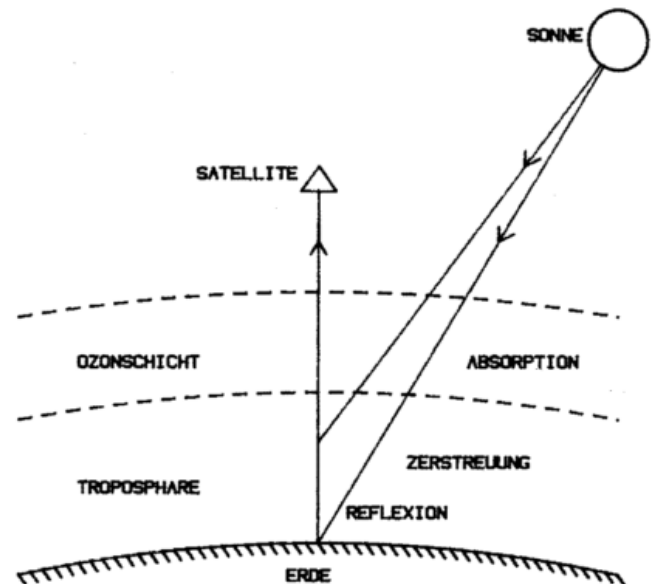


Abb. 1: Schematische Darstellung des Prinzips der BUV-Gesamtozon-Meßmethode.

In Wirklichkeit ist diese Messung natürlich nicht ganz so einfach. Die mehr komplexen Verhältnisse werden in Abbildung 2 dargestellt. Sie zeigt die Quellfunktionen für die nach oben gestreute Strahlung für 8 der 12 im BUV-Experiment verwendeten Wellenlängen. Die stark absorbierenden Wellenlängen

255,5 bis 305,8 nm werden für die Ozonprofilbestimmung benutzt (s. Beitrag 8), während die längeren Wellenlängen für die Messung des Gesamtzons herangezogen werden. Betrachtet man die Quellfunktion für 312,5 nm, so stellt man fest, daß ein erheblicher Prozentsatz der zurückgestreuten Photonen die Ozonschicht nicht durchdrungen hat (die Basis der Ozonschicht ist etwa an der Tropopause). Dementsprechend kann ein einfaches mathematisches Modell keine ausreichende Genauigkeit ergeben.

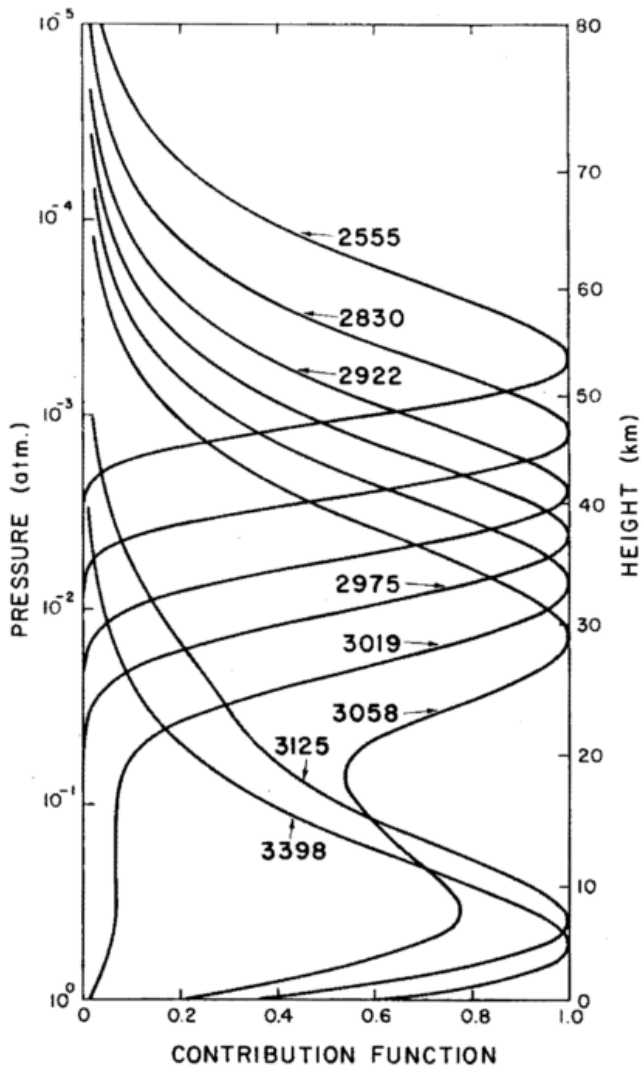


Abb. 2: Anteil der aufwärts gerichteten Streustrahlung für verschiedene Höhen der Atmosphäre. Die Kurven sind auf den Wert des Maximums normalisiert. Sie gelten für eine Bodenreflektivität 0, einen solaren Zenitwinkel von  $60^\circ$ , Meßrichtung zum Nadir und einen Gesamtzonenwert von 336 DU.

In der Praxis wird daher eine Tabellendarstellung und Interpolationsmethode für die Berechnung des Totalozons aufgrund von BUV-Satellitenmessungen benutzt. Der erste Schritt ist die Entwicklung eines Standard-Ozonprofils aus der statistischen Analyse von Ozonsonden- und Raketensondenmessungen, und zwar für unterschiedliche Gesamtzonenmessungen (z. B. 250, 300, ..., 500 DU) und für niedrige, mittlere und hohe Breiten. Als nächstes wird die erwartete

Rückstreuung auf den Satelliten für jedes dieser Standardprofile ausgerechnet, und zwar für verschiedene Zenitwinkel der Sonne und verschiedene Oberflächenreflektivitäten. Ein gleichgearteter Satz von Tabellen wird für den Wellenlängenbereich konstruiert, der für die Messung der Reflektivität der Troposphäre benutzt wird (in diesem Fall ist keine Ozonabhängigkeit gegeben). Vom Reflektivitätskanal und dem solaren Zenitwinkel wird die troposphärische Reflektivität interpoliert. Dann kann man zur Festlegung des Gesamtzons in die Hauptozontabellen eingehen.

Während der Entwicklungsphase der ersten BUV-Gesamtzonenexperimente wurde gefunden, daß die Nutzung von zwei Wellenlängenpaaren (wie beim Dobsongerät) den zu erwartenden Fehler reduziert (s. DAVE u. MATEER 1967). Diese Fehler ergeben sich aus der ungenauen Kenntnis des Luftdrucks an der Obergrenze der Wolken. Dementsprechend benutzte der BUV-Gesamtzonen-Bestimmungslogarithmus Wellenlängenpaare, und zwar für tiefstehende Sonne 317,5/339,8 nm, für mittlere und hohe Sonnenstände 312,5/331,2 nm. Normalerweise befand sich an Bord des Satelliten noch ein anderer Meßfühler, mit dessen Hilfe die Wolkenobergrenze abgeschätzt sowie zwischen Schnee- oder Gesamtwolkenbedeckung unterschieden werden konnte.

Es muß noch ein weiterer Faktor diskutiert werden. Um die BUV-Strahlung am Satelliten berechnen zu können, muß die Stärke der Lichtquelle für jeden Wellenlängenbereich bekannt sein. In der Praxis wird dies vom Satelliteninstrument in folgender Weise ausgeführt: Einmal am Tag, in der Nähe eines Satelliten-Sonnenuntergangs, wird eine schmale Diffusionsreflektorplatte in das Sichtfeld des Spektrometers eingeschoben. Diese Platte blockiert das von der Erde zurückgestreute Ultraviolett und reflektiert zur gleichen Zeit das direkte Solar-Ultraviolett in das Spektrometer. Diese Diffusionsplatte stellt eine Hauptstärke, aber auch eine Hauptschwäche der BUV-Methode dar. Es ist eine Stärke der Methode, da die Berechnungstabellen nach dem Verhältnis BUV-Strahlung/Sonneneinstrahlung zusammengestellt sind, d.h. nach der effektiven Albedo. Daraus ergibt sich für die Ozonmessung keine Gefahr bei einem langsamen Driften der genauen Absoluteichung des Spektrometers oder der Photomultiplier-Eichung während eines mehrjährigen Experiments. Die Schwäche liegt in der Tatsache, daß die Diffuserplatte an einer beidseitigen graduellen Abschwächung ihrer Reflexionskraft durch Partikel in der Satellitenumgebung, die sich auf der Platte ablagern leidet. Es wurden empirische Methoden entwickelt, um diese Abschwächung weitgehend abschätzen zu können. Der verbleibende Rest von einem Bruchteil eines Prozents pro Jahr macht diese Abschätzung jedoch schwierig, wenn nicht gar unmöglich. Dieses Problem dürfte bei SBUV/2 überwunden sein, denn dieses Meßsystem besitzt eine kleine Quecksilberlampe, um die Diffusionsdrift zu messen. Zusätzlich war geplant, ein BUV-Instrument im Space Shuttle zu betreiben, um die effektive Albedo zu messen. Das Space Shuttle Instrument würde zur Erde zurückgebracht, so daß die Kalibrierung der Diffuserplatte vor und nach jedem Flug überprüft werden kann.

### 3.2 Das TOMS-Experiment

Für die Darstellung von Ergebnissen sollen hier nur Gesamtzonenmessungen aufgrund des „Total Ozone Mapping Spec-

trometer“ (TOMS) auf Nimbus 7 gezeigt werden, der Ende Oktober 1978 gestartet wurde. Dieses Meßexperiment und das „Solar Backscattered Ultraviolet“ (SBUV) Experiment sind während der Abfassung dieses Artikels noch immer operationsfähig. TOMS wurde entwickelt, um detaillierte Gesamtzonkarten für jeden Tag über den größten Teil der von der Sonne beschienenen Erde zu erhalten. Das TOMS-Instrument ist ein einfaches Ebert-Fastie-Spektrometer mit einem festen Gitter und einer Reihe von Blenden. Es hat ein Sichtfeld von  $3 \times 3^\circ$  bei einer Spektralbandbreite von 1nm. Ein Abtastspiegel führt die quer zur Satellitenbahn erfolgende Abtastung in Schritten von je  $3^\circ$  aus. Die Messung quer zu Bahn erfolgt alle 8 Sekunden mit insgesamt 35 Gesamtzonen-Beobachtungen bei jeder Abtastung; in jedem Zyklus werden auf jeder Seite der Satellitenbahn vom Nadir ausgehend  $51^\circ$  erfaßt. Jede Gesamtzonen-Beobachtung enthält die spektrale Abtastung des rückgestreuten Ultraviolets in 6 Wellenlängenbändern (312,5; 317,5; 331,2; 339,8; 360,0 und 380,0 nm). Nähere Beschreibungen sind bei FLEIG et al. (1982) und KLENK et al. (1982) zu finden.

### 3.3 TOMS-Ergebnisse

Die hohe räumliche Auflösung und die hohe Korrelation zwischen Wettersystemen und Gesamtzonen zeigt das Titelbild. Es stellt eine farbige Wiedergabe des globalen Gesamtzons am 29. 05. 1979 dar. Es ist bekannt, daß hohe horizontale Gradienten des Gesamtzons stark mit einem Strahlstrom korrelieren. Die kurzen schwarzen Streifen und Punkte im Äquatorialbereich und  $75^\circ$  östlicher Länge repräsentieren fehlende Ozondata aufgrund des Eichzyklus. Die schwarzen Bereiche südlich von  $65^\circ$  südlicher Breite sind fehlende Meßdaten infolge der südlichen Polarnacht.

möglich. TOMS liefert nur brauchbare Messungen bei Sonneneinstrahlung im Meßbereich, d.h. Messungen sind im extremen nördlichen und südlichen Polarbereich während der Polarnachtperioden unmöglich. Während der TOMS-Dobson Vergleiche im Laufe des ersten Jahres der TOMS-Operation betrug der mittlere Abstand zwischen dem Zentrum des TOMS-Meßfeldes und der jeweiligen Dobson-Station etwa 22 km, und die mittlere Zeitabweichung zwischen den beiden Beobachtungen betrug etwa 1 Stunde (BHARTIA et al. 1984).

Die kleinen Rechtecke in Abbildung 3 zeigen die mittlere monatliche Abweichung zwischen den Dobson-Stationen und den TOMS-Messungen während der ersten 4 Jahre der TOMS-Operation. Bei der Berechnung dieses Mittelwertes wurde jeder Dobson-Station das gleiche Gewicht gegeben. Es wurden aber für jeden einzelnen Monat die Stationen ausgesondert, bei denen die Standardabweichung ihrer Differenzbeträge 5% oder größer waren, oder wenn die mittlere Differenz für diese Station mehr als zwei Standardabweichungen von der Gesamtabweichung des Dobson-Netzes entfernt lag. Es muß darauf hingewiesen werden, daß Änderungen im TOMS-Algorithmus zwischen dem 1. Jahr und dem 2. Jahr sowie zwischen dem 2. Jahr und 3. Jahr vorhanden waren. Diese Änderungen beinhalten in erster Linie eine Verbesserung der Charakterisierung der nach zwei Seiten gerichteten Reflektivität der Diffuserplatte und entsprechender Auswertungen. Die so entstandenen Brüche in der Kurve (Abb. 3) verschwinden, sobald die TOMS-Daten erneut mit einem einheitlichen Algorithmus überarbeitet worden sind. Die jährlichen mittleren Differenzen zwischen Dobson- und TOMS-Daten sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt. Dabei wurden nur die bestmöglichen Dobson-Meßwerte (di-

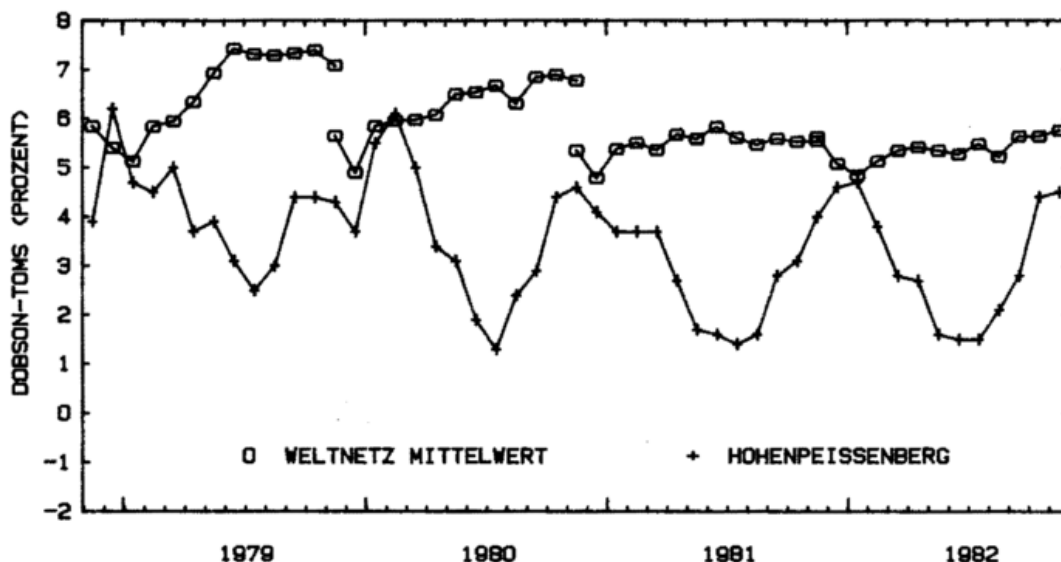


Abb. 3: Monatliche mittlere prozentuale Abweichungen zwischen Dobson- und TOMS-Gesamtzonenmessungen für die ersten vier Jahre der TOMS-Operation. O Mittel des gesamten Dobson-Netzwerks; + Mittel für Hohenpeissenberg allein.

Da Nimbus 7 eine polare Umlaufbahn in einem mondnahen sonnensynchronen Orbit hat, ist ein Vergleich zwischen TOMS-Daten und jeder Dobson-Station fast für jeden Tag

rechte Sonne, AD-Doppelmessung) benutzt. Auch hier sind alle Stationen mit einer Abweichung  $> 2$  Standardabweichungen vom Mittel des Dobson-Netztes ausgeschlossen.

Tab. 1: Abweichung der mittleren Werte des Dobson-Netzes von TOMS-Daten

Jahr	Mittel	Standard-abweichung	Anzahl der Stationen
1	6,51	1,78	57
2	6,27	1,19	63
3	5,42	2,05	60
4	5,34	1,72	62

Ein Blick auf Abbildung 3 zeigt den gegenseitigen Nutzen von Satelliten- und Bodenmeßwerten klar auf. Auf der einen Seite liefert das Bodennetzwerk Informationen über die Stabilität von Satellitensystemen. Die Überprüfung der Ergebnisse des ersten Jahres zeigte sehr klar, daß das Satellitengerät wegdriftet, und diese Drift konnte schnell auf die Abschwächung der Diffuserplatte zurückgeführt werden. Auf der anderen Seite

stellt das Satellitensystem ein recht gutes Werkzeug für die Diagnose stationsinterner Unterschiede im Bodenmeßnetz dar. Die zweite Kurve in Abbildung 3 zeigt die mittlere monatliche Abweichung des Hohenpeißenberg-Dobsons von TOMS. Zwei Dinge sind klar erkennbar. 1. Die Hohenpeißenberger Gesamtozondaten sind insgesamt niedriger als im Gesamtozon-Netzwerk. 2. Es existiert ein ausgeprägter Jahrgang, wobei die Dezember-Werte etwa mit dem Gesamtbodennetz zusammenstimmen, im Hochsommer aber Abweichungen bis zu 4% darunter auftreten. Diese jahreszeitlichen Unterschiede führten zu dem Hinweis, daß ein nicht ganz korrekter Wert für den extraterrestrischen Strahlungsfluß bei der Berechnung der Hohenpeißenberger Dobson-Werte benutzt wurde. Abbildung 4 und 5 zeigen entsprechende Vergleiche mit Arosa, Schweiz, und Biscarosse, Frankreich. In Arosa liegt das Dobson-Instrument einige Prozent unterhalb des gesamten Weltnetzes, wobei besonders der Dezember und Januar als sehr tief in Erscheinung treten. Für Biscarosse ist eine Abwärtsdrift des Dobsongerätes während der Hochsommerperioden erkennbar. Abgesehen von dem o. g. Problem

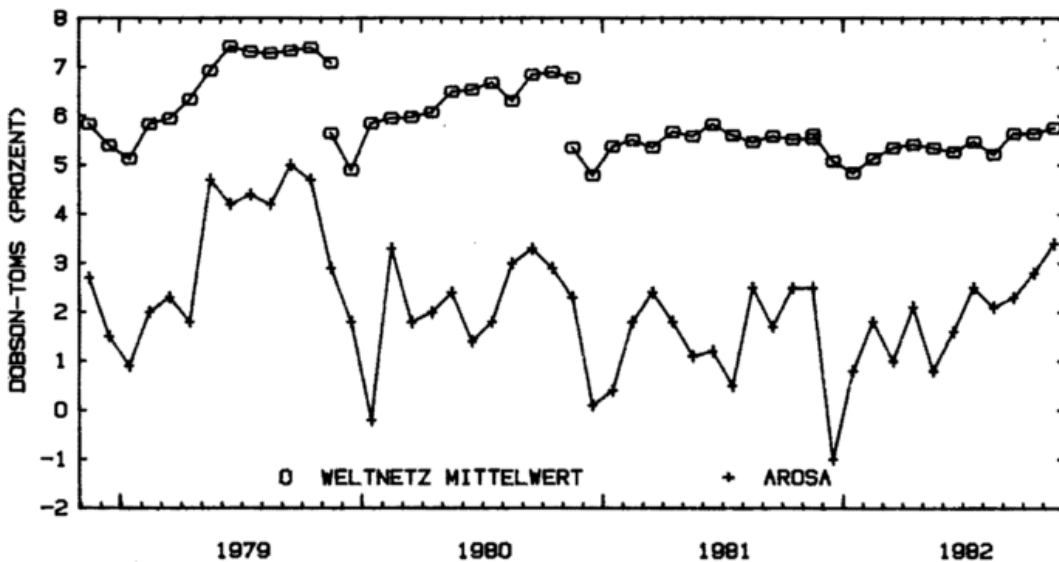


Abb. 4: Wie in Abb. 3, jedoch für Arosa, Schweiz.

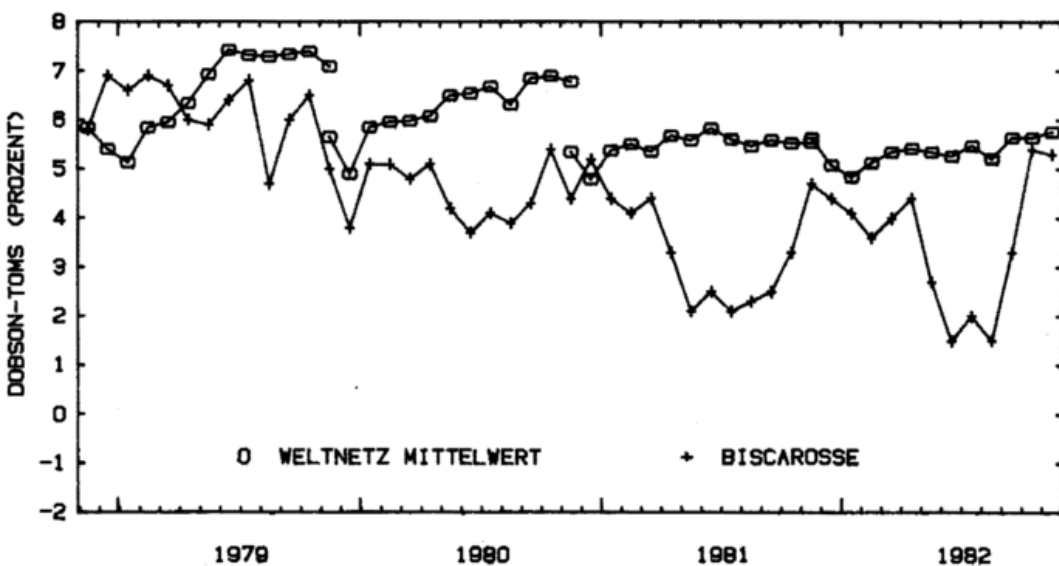


Abb. 5: Wie in Abb. 3, jedoch für Biscarosse, Frankreich.

zeigt der Hohenpeißenberg, daß er eine der zwei stabilsten Dobson-Stationen über diese 4-Jahres-Periode ist. Die mittleren jährlichen Abweichungen über diese 4 Jahre der Hohenpeißenberger Messungen vom Gesamtweltnetz waren 2,51, 2,68, 2,57 und 2,32%. Nur Shiangher, China, lag noch darunter mit Werten von 0,36, 0,13, 0,31 und 0,004%. Für beide Stationen betrug der Unterschied zwischen den höchsten und tiefsten Werten weniger als 0,4%!

Die Variabilität der Vergleiche zwischen Satelliten- und Bodensinstrumenten kann drei Ursachen haben: 1. Die Fehlermöglichkeiten des Bodengerätes, 2. die Fehlermöglichkeiten der Satellitenmessung einschließlich der Fehler des benutzten Algorithmus und 3. die Fehlerquellen bei der Vergleichszusammenstellung; die zwei Instrumente erfassen ja nicht genau die gleiche Menge Ozon. Für das erste Jahr der TOMS-Operation hatten 16 von 61 Dobson-Stationen eine Standardabweichung von weniger als 2%. Der Medianwert war dabei 2,4%. Wenn wir annehmen, daß die Genauigkeit der Dobson-Beobachtung 1% ist und die Genauigkeit des Dobson-TOMS-Vergleichs ebenfalls 1%, dann müßte die Genauigkeit der TOMS-Gesamtozonbestimmung kleiner als 2% sein. Wie bereits bemerkt, beinhaltet dieser Wert sowohl die instrumentelle Unsicherheit als auch die des verwendeten Algorithmus (Näheres s. BHARTIA et al. 1984). Einige Bemerkungen müssen zu der systematischen Abweichung von 5–6% zwischen dem Dobson-Netz und TOMS gemacht werden. Dies dürfte darauf zurückzuführen sein, daß in beiden Fällen verschiedene Labor-Ozon-Absorptionskoeffizienten benutzt werden. Wenn man die gleichen (neueren) Absorptionskoeffizienten für beide Geräte benutzt, zeigt sich, daß die mittlere Abweichung auf weniger als 3% reduziert wird.

#### 4 Schlußbemerkungen

Satelliten- und Bodenmessungen des Gesamtozons der Atmosphäre liefern sich ergänzende Daten der Gesamtozonverteilung. Diese Datensätze können mit Hilfe statistischer Techniken zusammenggeführt werden, um komplette globale Verteilungen auf einer täglichen Basis zu erhalten. Die Satelliten-Meßsysteme haben noch nicht den Stand erreicht, Totalozonverteilungen allein geben zu können. Es wird noch einige Zeit vergehen, bis dieses Stadium der Entwicklung erreicht sein wird.

#### Literatur

BHARTIA, P. K.; KLENK, K. F.; WONG, C. K.; GORDON D.: Intercomparison of the NIMBUS 7 SBUV/TOMS total ozone data sets with Dobson and M83 results. *J. Geophys. Res.* 89 (1984) S. 5239–5247.

CHU, W. P.; McCORMICK, M. P.: Inversion of stratospheric aerosol and gaseous constituents from spacecraft solar extinction data in the 0.38–1.0  $\mu\text{m}$  wavelensth resion. *Appl. Opt.* 18 (1979) S. 1404–1413.

DAVE, J. V.; MATEER, C. L.: A preliminary study on the possibility of estimatins total atmospheric ozone from satellite measurements. *J. Atmos. Sci.* 24 (1967) S. 414–427.

FLEIG, A. J.; KLENK, K. F.; BHARTIA, P. K.; GORDON, D.: User's suide for the Total-Ozone Mappings Spectrometer (TOMS) instrument first-year data set. NASA Ref. Publ. 1096 (1982).

KLENK, K. F.; BHARTIA, P. K.; FLEIG, A. J.; KAVEESHWAR, V. G.; McPETERS, R. D.; SMITH, P. M.: Total ozone determination from the Backscattered Ultraviolet (BUV) experiment. *J. Appl. Meteorol.* 21 (1982) S. 1672–1684.

LUTHER, F. M.; WEICHEL, R. L.: Determination of total ozone from DMSP multichannel filter radiometer measurements. In: *Proceedings of the Quadrennial International Ozone Symposium*, ed. by Julius London. International Ozone Commission, Boulder, Vol. 1 (1980) S. 17–24.

LUTHER, F. M.; ELLIS, J. S.; LOVILL, J. E.; SULLIVAN, T. J.; WEICHEL, R. L.: Global distributions of total ozone during January and February 1979 as determined from DMSP Multichannel Filter Radiometer measurements. In: *Proceedings of the Quadrennial International Ozone Symposium*, ed. by Julius London. International Ozone Commission, Boulder, Vol. 1 (1980) S. 406–409.

McCORMICK, M. P.; SWISSLER, T. J.; HILSEN RATH, E.; KRUEGER, A. J.; OSBORN, M. T.: Satellite and correlative measurements of stratospheric ozone: Comparison of measurements made by SAGE, ECC balloons, chemiluminescent and optical rocketsondes. *J. Geophys. Res.* 89 (1984) S. 5315–5320.

McMILLAN, L. M.; DEAN, C.: Evaluation of a new operational technique for producins clear radiances. *J. Appl. Meteorol.* 21 (1982) S. 1005–1014.

PLANET, W. G.; CROSBY, D. S.; LIENESCH, J. H.; HILL, M. L.: Determination of total ozone amount from TIROS radiance measurements. *J. Climate and Appl. Meteorol.* 23 (1984) S. 308–316.

# Aus dem Deutschen Wetterdienst

## Vorbemerkung

Aus Anlaß des 20jährigen Bestehens der numerischen Wettervorhersage im Deutschen Wetterdienst lud Präsident Dr. Reiser am 2. Oktober 1986 zu einer Feierstunde in das Büsing-Palais in Offenbach ein. Nach seinen einführenden Worten hielt Dr. Edelmann einen allgemeinverständlichen Vortrag über „Die Entwicklung der operationellen numerischen Wettervorhersage im Deutschen Wetterdienst.“ Zum Schluß sprach Dipl.-Ing. Brand (Control Data GmbH) über „Neue Entwicklungen auf dem Gebiet der Großrechner.“

Der nachfolgend wiedergegebene, etwas gekürzte Vortragstext von W. Edelmann behandelt in klarer, lebendiger und humorvoller Weise die Grundlagen. Voraussetzungen und Entwicklungsstudien der numerischen Wettervorhersage, die im Jahre 1966 im Deutschen Wetterdienst eingeführt und seitdem stetig weiter entwickelt wurde.

W. EDELMANN

## Die Entwicklung der operationellen numerischen Wettervorhersage im Deutschen Wetterdienst

„Verzeiht! Es ist ein groß Ergötzen, sich in den Geist der Zeiten zu versetzen, zu schauen, wie vor uns ein weiser Mann gedacht, und wie wir's dann zuletzt so herrlich weit gebracht!“  
(Goethe, Faust, I.T.)

20 Jahre numerische Wettervorhersage im Deutschen Wetterdienst: das ist sicher kein Grund zum Jubeln, wohl aber Grund genug zu einer Rückschau auf das Erreichte. Um den Fortschritt ins rechte Licht zu rücken, wollen wir uns kurz an die Situation vor dem „Numerischen Zeitalter“ erinnern.

### Die synoptische Vorhersagemethode

Während sich die exakten Naturwissenschaften im 19. Jahrhundert überaus stürmisch entwickelten, stand die Wettervorhersage ziemlich weit im Abseits. Der Meteorologe war auf qualitative Regeln angewiesen, welche er subjektiv anwenden mußte. Man denke dabei nicht an plumpe, kalauernde Bauernregeln oder den „Hundertjährigen Kalender“. Es ging viel seriöser zu.

Ein erfahrener Beobachter konnte aus den Zeichen am Himmel das Wetter für die nächsten Stunden mutmaßen. Das realistische Ziel des Meteorologen war eine bessere Vorhersage für den kommenden Tag. Dazu braucht er aus einer weiten Umgebung gleichzeitige Beobachtungen von Luftdruck, Wind, Temperatur, Feuchte, Wolken und Wetter. Zunächst war das Beobachtungsnetz am Boden noch ziemlich dünn und lückenhaft. Besonders wichtig sind jedoch Messungen aus höheren Luftschichten. Sie wurden anfangs ganz vereinzelt von Drachenaufstiegen und Flugzeugen gewonnen. Seit rund 50 Jahren stammen sie vor allem von Radiosonden, die mit Ballons 20 bis 30 km hoch getragen werden.

Alle Messungen und sonstigen Beobachtungen werden umgehend in einen Zahlencode verschlüsselt und über Funk verbreitet. Technisch gesehen war damals das Zeitalter des Kopfhörers. Stundenlang das Piepen der Morsezeichen im Ohr endlose Zahlenkolonnen zu schreiben: man kann sich schwer eine monotonere Arbeit vorstellen, die gleichzeitig höchste Konzentration erfordert. Wesentlich anregender, obgleich unter großem Zeitdruck, war das nachfolgende Entschlüsseln und Einzeichnen der Beobachtungen in die Wetterkarte. Dabei bediente man sich eines kleinen Federhalters mit zwei Federn nebeneinander — links rot und rechts schwarz, um den Wirrwarr von Zahlen und Symbolen besser auseinanderzuhalten.

Nun kommt die Stunde des Meteorologen. Aus der Zusammenschau der gleichzeitigen Beobachtungen, der „Synoptik“, analysiert er die Lage der Hochs, Tiefs und Schlechtwetterfronten. Dann stellt er fest, wie sich diese Gebilde in den letzten Stunden bewegt und verändert haben. Schließlich versucht er zu extrapolieren, wies sie sich wohl weiter bewegen könnten. In der Natur geht es dabei durchaus nicht geradlinig zu. Tiefs können Haken schlagen, sich beschleunigen oder liegen bleiben, aufspalten oder miteinander verschmelzen, verstärken oder verschwinden. So wurde ziemlich grob und mit häufigen Irrtümern eine Vorhersagekarte konstruiert, welche zeigt, von woher wir das Wetter von morgen importieren werden. Alles dies war solide Handarbeit.

Die synoptische Vorhersagemethode erreichte in den 50er Jahren ihren Gipfel und ihre Grenzen. Mehr war so nicht herauszuholen. Der Meteorologe hatte außer unscharfen Regeln noch viel Spielraum für seinen fehlbaren Instinkt. Auf die Dauer konnte

das nicht befriedigen. Die Wettervorhersage bedurfte dringend eines festen Fundaments.

### Grenzen der Vorhersagbarkeit

Die Physik hat im 19. Jahrhundert die wesentlichen Prinzipien und Gesetze bereitgestellt und mathematisch formuliert: das Newtonsche Axiom „Kraft = Masse · Beschleunigung“, die Erhaltung von Masse und Energie, die Hauptsätze der Thermodynamik und vieles mehr. Man glaubte damals an einen strengen Determinismus in der Natur. Dieser Anschauung hat Laplace, der große Mathematiker und Astronom, wohl den radikalsten Ausdruck verliehen. Er war der Schöpfer eines hypothetischen SuperGenies, des sogenannten „Laplaceschen Dämons“. Wenn dieser begabte Rechner den augenblicklichen Zustand des Weltalls bis aufs letzte Atom genau kennt, dann könne er jeden zukünftigen Zustand des Weltalls (und damit natürlich auch das Wetter) absolut genau vorherberechnen — von Ewigkeit zu Ewigkeit! Von Laplace stammt der hochmütige Satz: „Gott? Diese Hypothese brauche ich nicht!“

Wir sind heute viel bescheidener geworden. Seit Heisenberg ist von strengem Determinismus nicht mehr die Rede. Der Vorhersagbarkeit von Vorgängen in der Natur sind ganz prinzipiell unüberschreitbare Grenzen gesetzt. Im atomaren Bereich gibt es keine genauen, scharfen Vorhersagen für das einzelne Teilchen. Dort gelten nur Wahrscheinlichkeitsgesetze. Der Astronom dagegen vermag Sonnen- und Mondfinsternisse über Jahrtausende hinweg vorherzusagen. Wo liegen die Grenzen der Meteorologie? Diese interessante Frage läßt sich nicht mit einer einzigen Zahl beantworten.

Wir haben es in der Atmosphäre mit einem weiten Spektrum von Größenordnungen zu tun. Diese sogenannten „scales“ reichen räumlich von Vorgängen, die den ganzen Globus umfassen, über Wellen von kontinentaler Ausdehnung, regionale Hochs und Tiefs, lokale Wirbelchen, Prozesse um die Schneeflocke und das Nebeltröpfchen bis hinab in atomare Dimensionen. Das zeitliche Spektrum ist entsprechend breit. Die Gleichungen, welche das Geschehen in der Atmosphäre beschreiben, haben ganz aufregende Eigenschaften: ihre wesentlichste und unbequemste ist die Nicht-Linearität. Die Variablen sind sehr kompliziert miteinander verbunden. Daraus folgt, daß alle „scales“ kreuz und quer untereinander in Wechselwirkung stehen. Alles was in irgendeinem „scale“ geschieht, und sei es noch so geringfügig, beeinflußt die Zukunft aller anderen „scales“.

Man könnte gefühlsmäßig einwenden: was macht es schon für unser Wetter aus, wenn ein bunter Schmetterling in den Tropen durch seinen Flügelschlag gerade eben die Atmosphäre etwas stört? Das dürfen wir doch vergessen! Aber die Atmosphäre vergift nichts. Die Störung wird sich als winzige Druckwelle ausbreiten. Unter stabilen Bedingungen wird sie dabei immer schwächer. Doch irgenwo trifft sie labile Bedingungen an. Dort entwickelt sie sich. Innerhalb ziemlich kurzer Zeit wird sie ihre Stärke verdoppeln, nochmals verdoppeln, abermals verdoppeln. Aus einem Nichts wird sehr bald ein Etwas. Dies gerät mit anderen Störungen in Wechselwirkung. Es wächst zu immer größeren Dimensionen, vielleicht gar zu einer Katastrophe heran! Man täte dem Schmetterling unrecht, wenn man ihm die Schuld daran zuschöbe. Das wäre auch ohne ihn irgendwie passiert, aber eben anders.

Wir bedürfen nicht dieses Schmetterlings, um an unsere Grenzen zu stoßen. Selbst der Laplace'sche Dämon könnte, wegen der prinzipiellen Unschärfe im atomaren Bereich, keine sicheren Vorhersagen machen. Die Genauigkeit nimmt mit der Zeit ab, und zwar sehr schnell für den mikroskopischen Bereich. Die Unsicherheit frißt sich langsam, über Stunden, Tage, Wochen in immer größere „scales“ hinein, bis sich schließlich alles im Nebel völliger Unbestimmtheit verliert. Aus praktischen Gründen verläuft der Verfallsprozeß unserer Vorhersagen viel schneller. Wie schnell? Das ist im Einzelfall von Ort zu Ort, von Wetterlage zu Wetterlage, von Phänomen zu Phänomen sehr verschieden.

## Die Vorgeschichte der numerischen Vorhersage

Was wäre unsere numerische Vorhersage ohne ihre erregende Vorgeschichte? Kurz nach der Jahrhundertwende ermunterte, salopp formuliert, der Norweger Bjerknes die Meteorologen: „Ihr kennt doch die Gesetze der Physik! Warum wendet Ihr sie nicht auf die Atmosphäre an? Nun rechnet mal schön!“ Das ist leichter gesagt als getan. Denn „wo faß' ich Dich, unendliche Natur?“ Zehn Jahre später fing tatsächlich einer zu rechnen an. Es war der Engländer Richardson, und wenn er nicht verzweifelt wär', er rechnete noch heute! Die Zeit war einfach nicht reif für solch ein gewagtes Unternehmen.

Da der Wetterdienst dem Verkehrsministerium untersteht, soll die Situation der numerischen Vorhersage durch einen drastischen Vergleich aus dem Verkehrssektor illustriert werden. Der Auftrag lautet: „Man erkunde einen Weg von der rauhen Nordsee zur schönen Adria und bringe dort täglich eine Ladung frische Eier auf den Markt.“ Richardson, der „Neandertaler der numerischen Vorhersage“, machte sich auf den Weg, barfuß und ohne Kompaß durch die Urwälder Germaniens. Er kam niemals an, sondern darin um!

Gegen Ende der 30er Jahre trat der Schwede Rossby auf den Plan: ein genialer Vereinfacher. „In der Beschränkung zeigt sich erst der Meister.“ Alles, was sich ihm in den Weg stellte, das Gestrüpp der physikalischen Prozesse, die Thermodynamik, ganze Raumdimensionen wurden „mit der Steinaxt herausgeholt“. Was übrig blieb, war eine einzige Gleichung für die Dynamik, gemittelt über die vertikale Koordinate. Das war das allereinfachste, das sogenannte barotrope Modell der Atmosphäre, ein klapperdürrer Torso. Der wurde noch linearisiert. Dann war er mit Bleistift und Papier zu beherrschen und gab ein einziges Phänomen wieder: die Geschwindigkeit, mit der sich verschieden lange Wellen in einer gleichförmigen Westdrift verlagern. Man weiß, daß in den Wellenbergen bevorzugt warmes, trockenes Wetter herrscht, in den Wellentälern eher kühles, feuchtes. Damit war also ein erster, „holpriger Trampelpfad“ in den Urwald geschlagen. Er endete an der Donau.

Von nun an galt es, das ausgehungerte erste Modell der Atmosphäre allmählich aufzupäppeln. Statt der linearisierten Gleichung für idealisierte Wellen mußte die nichtlineare barotrope Gleichung für eine reale Wetterlage gelöst werden: eine dornenvolle Aufgabe! Kein direkter Königsweg führt ans

Ziel. Es gibt nur Näherungsmethoden. Der Zustand der Atmosphäre ist durch Zahlenwerte an einem Punktraster anzunähern, welches notgedrungen ziemlich grob ist. Feinere „scales“ gehen zwischen den etwa 400 km weiten Maschen des Gitternetzes verloren. Die beabsichtigte Vorhersagezeit muß durch dutzende oder gar hunderte von kleinen Zeitschritten überbrückt werden. Zu jedem Zeitschritt ist die Unmenge von Zahlen immer wieder von neuem intensiv miteinander zu verknüpfen: eine Wahnsinnsarbeit! 1950 war die Zeit reif, sie zu bewältigen.

In Amerika standen die ersten, ziemlich lahmen Computer bereit, damals als Wunderwerke bestaunt. Das Dreigestirn Charney, Fjortoft und v. Neumann bediente sich einer solchen „Postkutsche“. Die Reise dauerte sehr lange; das Ziel wurde glücklich erreicht. Jedoch viele Eier waren zerbrochen, der Rest verfault. Eine Wettervorhersage ist nämlich ein leicht verderbliches Gut: Wenn sie nicht innerhalb von Stunden auf den Markt kommt, ist sie nichts mehr wert. Höchst erstaunlich ist, was das einfache barotrope Modell schon leistet. Es sagt die großräumige Strömung in etwa 5 km Höhe für 1 bis 2 Tage leidlich gut voraus.

Was hier unten am Boden geschieht, kann das barotrope Modell nicht vorhersagen. Wir müssen die vertikale Variabilität, die Temperatur, die Thermodynamik einbeziehen. Ein sogenanntes baroklines Modell besteht aus mehreren Schichten übereinander. Nur zwei Schichten bringen keinen Fortschritt. 3, 4 oder 5 müssen es schon mindestens sein. Dieser Abschnitt der Geschichte ist mit dem Namen Hinkelmanntrennbar verbunden. Das ganze Unternehmen, es ist kaum zu glauben, begann mit einer plumpen, mechanischen Tischrechenmaschine! Um in unserem Bild zu bleiben: es war eine unendlich mühsame „Expedition mit Maulseln“.

Erst ab 1957 konnten wir in Paris oder Amerika stundenweise einen IBM-Rechner mieten. Mit einer solchen „Postkutsche“ wurde das schwierige Terrain erkundet und in aller Stille ein „blitzblankes Gleispaar“ über die Alpen hinweg verlegt. Im November 1965 bekam der Deutsche Wetterdienst von Control Data einen Rechner der jüngsten Generation, ein nagelneues „Lokomotivchen“ geliefert. Im Sommer 1966 folgte ein zweites mit dreimal so viel PS.

Viel Infrastruktur mußte entwickelt werden. Probefahrten waren nötig. Anfang Oktober 1966 dampfte dann unser erstes „barotropes Züglein“ munter und pünktlich nach Fahr-

plan los. Dies ist der Tag, den wir heute feiern. Als dann in den nächsten Fahrplan, gültig ab 1. Oktober 1967, ein baroklines Modell mit 5 Flächen aufgenommen wurde, war das eine echte Attraktion.

Es sei angemerkt, daß dieser „schwere Güterzug“ nur selten mit Maschinenschaden auf der Strecke liegen blieb. Die Ingenieure von CDC bekamen die Lok immer erstaunlich schnell wieder flott. In der ersten Zeit sprang der Zug manchmal aus den Schienen. Anstatt einer vernünftigen Vorhersage kam das absolute Zahlenchaos heraus. Das numerische Rechenverfahren war aus irgendeinem finsternen Grund instabil geworden, und der mußte schnellstens gefunden, beseitigt und auch für die Zukunft ausgeschlossen werden. Dann klingelten die Telefone, mit Vorliebe an Sonn- und Feiertagen, oder früh zwischen 3 und 4 Uhr. Der „Große Krisenstab“ wurde einberufen; die Köpfe rauchten; kriminalistischer Spürsinn war vonnöten, bis die große Erleuchtung über eine meist sehr kleine Ursache kam.

### Das operationelle System

Zum operationellen Betrieb gehört viel mehr als ein leidlich realistisches Vorhersagemodell. Mindestens 7 Dinge sind nötig: zu allererst ein dreidimensionales Beobachtungsnetz. Am Boden (Abb. 1) gibt es eine Überfülle von Informationen aus Europa, dagegen immer noch riesige Löcher in der Arktis, in der Sahara, in Entwicklungsländern und Krisengebieten. Auf den Ozeanen bekommen wir Beobachtungen längs der Küsten und Schiffsrouten. Abseits davon herrscht gähnende Leere. Ähnliches gilt auch für höhere Luftschichten. Aus den Lücken heraus wächst ein Teil unserer Vorhersagefehler. Die Wettersatelliten aus jüngster Zeit bringen hier einige Besserung. Ich denke dabei nicht an die schönen Wolkenbilder. Viel wichtiger sind uns die Messungen der Strahlungsintensität, gesondert in vielen verschiedenen Spektralbereichen, sichtbar und infrarot. Daraus lassen sich vertikale Temperatur- und Feuchteprofile für die vom Satelliten „gesehenen“ Orte ableiten — meßtechnisch, physikalisch und mathematisch ein äußerst heikles Problem.

Zweitens brauchen wir ein leistungsfähiges Fernmeldenetz, welches in der Lage ist, die ganze Datenflut innerhalb sehr kurzer Zeit weltweit einzusammeln und auszutauschen. Der Funker mit dem Kopfhörer ist zu einer Randexistenz geworden. Ansonsten beherrschen Satellitenfunk und moderne Fernschreiblinien die Szene. Irgendwie müssen die Daten in unseren Computer hineingefüttert werden. Vor 20 Jahren war das noch ein

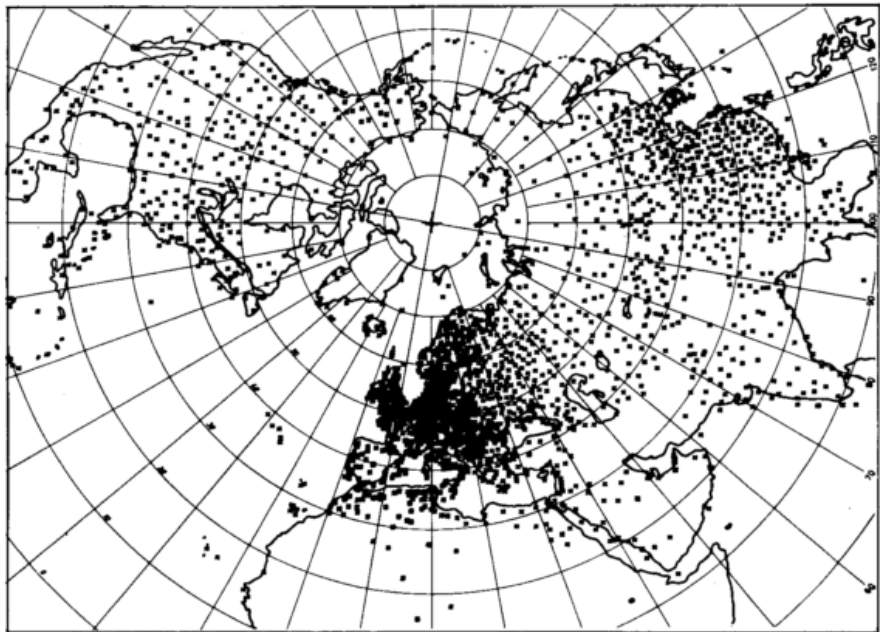


Abb. 1: Beobachtungsnetz am Boden (ohne Schiffe)

umständlicher Vorgang. Die Fernschreiber, ein rundes Dutzend gleichzeitig, produzierten als Neben- und Abfallprodukt Lochstreifen aus Papier — kilometerweise! Die wurden ab und zu von den Operateuren abgeschnitten, zusammengeklebt (aber bitte nicht verkehrt herum), auf eine große Spule gewickelt, auf ein spezielles Lesegerät montiert. Über dieses lief der Lochstreifen, kompliziert in vielen Schlingen und Schlaufen, manchmal gab es auch Papiersalat. Er wurde von Photozellen abgetastet, auf ein Magnetband übertragen, und dieses endlich zu einer Leseinheit des Computers gebracht. Heute geschieht dies alles ganz direkt, in geheimnisvoller Elektronik verborgen viel schneller und sicherer über einen besonderen Fernmelderechner.

Nun sind die Beobachtungen „in der Maschine drin“ — aber erst im Roh-Text! Es folgt der dritte Schritt: sie müssen entschlüsselt, interpretiert und intensiv überprüft werden. Denn nicht alles was ankommt, ist die reine Wahrheit. Es gibt Meßfehler, Beobachtungsfehler, Verstöße gegen die Verschlüsselungsvorschriften, Übertragungsfehler. Solche Beobachtungen werden entweder korrigiert oder mit einem Vermerk des Zweifels versehen. Das gesamte Material wird wohlortiert auf eine Datenbank gebracht. Diese war früher ein schwerfälliges Magnetband, welches endlos vor und zurück gespult werden mußte. Heute ist die Datenbank auf flexiblen Plattenspeichern untergebracht, die flotten Zugriff an beliebiger Stelle erlauben.

Als Punkt 4 ist die numerische Analyse an der Reihe. Sie hat aus den unregelmäßig verstreut liegenden Beobachtungen die Werte an den Punkten des Modellgitters zu interpolieren. Das wäre einfach, wenn es nur richtige und genaue Messungen in einem überall gleichmäßig dichten Beobachtungsnetz gäbe. Das ist leider absolut nicht der Fall. In Wirklichkeit ist die numerische Analyse ein ganz widerlich kompliziertes Problem. Jede Beobachtung muß nochmals bewertet, geglaubt oder ausgeschieden werden. Dabei sind Irrtümer in datenarmen Gebieten nicht auszuschließen. Erschwerend kommt hinzu, daß Flugzeuge und Satelliten nicht zur gewünschten „synoptischen“ Zeit, sondern zu unregelmäßigen Zwischenzeiten beobachten. Der größte Schönheitsfehler ist die Notwendigkeit, auch beobachtungleere Gebiete mit Gitterpunktwerten füllen zu müssen. Die sollten die Wirklichkeit darstellen; niemand kann es nachprüfen. Als Orientierungshilfe stand anfangs nur die Analyse vom vorhergehenden Termin und klimatologisches Hintergrundwissen zur Verfügung.

Seit 1980 benutzen wir stattdessen die jüngst vorangegangene Vorhersage. Analyse und Modell sind seither zu einer höheren Einheit verschmolzen, die unter dem volltönenden Namen „4dimensionale Datenassimilation“ bekannt ist.

Nach der Analyse und einigen Ausgleichsrechnungen ist an fünfter Stelle die Stunde des Vorhersagemodells gekommen. Es liefert seine Ergebnisse in der Datenbank ab.

Als sechster Punkt folgt die Darstellung der Ergebnisse. Schon von Anfang an hatten wir wunderhübsche Kurvenzeichengeräte, sogenannte Plotter der Firma Calcomp zur Verfügung. Mit Hilfe entsprechender Programme können diese praktisch alles darstellen, sogar in schwarz und rot, wenn es gewünscht wird. So wurde das technische Personal bald von einer Menge stumpfsinniger Arbeit entlastet. Fortan bekam der Meteorologe exakt gezeichnetes Arbeitsmaterial in erdrückender Menge und Vielfalt, direkt aus der Maschine!

Siebtens schließlich gehört der Aufbau eines Archivs zum operationellen System. Alle Beobachtungen, Analysen und Vorhersagen sind auf hunderten von randvollen Magnetbändern gespeichert. Sie stehen bereit für monatliche und jährliche Statistiken, wissenschaftliche Untersuchungen, besonders für die Prüfung der numerischen Vorhersagen nach vielen Kriterien. Damit werden Schwächen und Fehler des Systems aufgedeckt, Ansatzpunkte für Verbesserungen gefunden.

### Die weitere Modellentwicklung

Bereits die Urform des 5-Flächen-Modells konnte einiges leisten. Ein Experiment aus dem Jahr 1963 startete mit kreisrundem Hoch und Tief, aufgelöst durch ziemlich viele Gitterpunkte, eingeschlossen in einen periodischen Kanal. Ein gleichförmiges Temperaturgefälle von der Südwand zur Nordwand war vorgegeben. Diese Situation ist entwicklungssträchtig. Erwartungsgemäß haben sich Hoch und Tief verstärkt und das Temperaturfeld verformt. Die große Überraschung war die Bildung einer Warmfront und einer Kaltfront mit scharfen Knicken in den Isobaren des Bodendruckes. Das war eine Sternstunde! Wie in einem Lehrbuch haben sich geneigte Frontflächen mit Warmluft über der Kaltluft eingestellt und die zugehörigen charakteristischen Vertikalbewegungen entwickelt. Dieses Modell kennt noch keine Feuchtigkeit, Wolken, Niederschläge; es ist ein trockenes Modell. Aber die Vertikalbewegung sagt bereits einiges aus. Man weiß, daß sich bei Aufsteigen Wolken oder gar Niederschläge entwickeln, bei Absinken dagegen Wolken auflösen.

Die vergangenen 20 Jahre waren geprägt vom Bemühen, das Modell Schritt für Schritt der wirklichen Atmosphäre anzunähern: ein Weg vom Einfachen zum Komplizierten! Da eine komplette Vorhersage in ein bis zwei Stunden gerechnet sein muß, waren schmerzliche Kompromisse zu schließen. Der Einbau einer sechsten Fläche, die Einführung von Ozean bzw. Erdboden, Wärme-

austausch zwischen diesen und der Atmosphäre, schließlich eine sehr grobe Berücksichtigung des Einflusses von Gebirgen waren das Äußerste, was unsere erste Rechanlage verkraften konnte. Viele Wünsche blieben auf der Strecke: Nicht der ganze Globus, nur ein achteckiges nordhemisphärisches Teilgebiet war zu schaffen. Die künstliche Begrenzung in den Tropen ist eine ständige Fehlerquelle, auch heute noch. Von dem sehr groben Gitternetz mit rund 400 km Maschenweite kamen wir nicht herunter. Auf die ganze übrige Physik mußten wir noch verzichten.

Das Jahr 1977 brachte eine tiefe Zäsur in die Geschichte unserer 20 Jahre: die nächste Computer-Generation ging in Betrieb. Glanzstück des komplexen Systems ist die Cyber 76 mit 20- bis 25-facher Rechenkapazität. Jetzt glaubten wir, aus dem Vollen schöpfen zu können. Aber sehr bald wurde es wieder eng. Der Speicherplatz, damals noch teuer, war knapp bemessen. Das ist etwa dasselbe wie ein zu kleiner Schreibtisch für einen fleißigen Beamten. Wenn er für komplizierte Vorgänge viele Akten gleichzeitig braucht, muß er dauernd abräumen, irgendwo zwischenlagern, Platz für andere Akten frei machen. Er ist fast nur damit beschäftigt und kaum noch produktiv. Mit dem nächsten Computer, 1987, sind wir dieses lästige Problem hoffentlich für eine Weile los.

Das neue Modell für die Cyber 76 wurde von 6 auf 9 Flächen aufgestockt, das Gitternetz von 400 auf 250 km verfeinert, das Vorhersagegebiet um einiges vergrößert, die Vorhersagezeit von 2 auf 4 bis 6 Tage verlängert. Damit war die Hälfte der neuen Kapazität verbraucht. Die andere Hälfte ging für die physikalischen Prozesse des neuen Modells drauf. Das alles hat sich sehr gelohnt. So haben zum Beispiel die systematischen Fehler von 48stündigen Vorhersagen im 500 mb-Niveau im Winterquartal 1976/1977 Beträge von 10 bis 20 Dekameter erreicht. Der Ausbau des trockenen 6-Flächen-Modells war damals schon beendet. 8 Jahre später war die Arbeit am 9-Flächen-Modell noch keineswegs abgeschlossen. Dennoch betragen die systematischen Fehler im Winter 1984/85 nur 2 bis 4 Dekameter: ein schöner Fortschritt!

Betrachten wir nun den physikalischen Aufbau (Abb. 2). Die Figur ist der Beschreibung des Modells vom Europäischen Rechenzentrum entnommen. Sie gilt fast unverändert für unser Modell. In Wirklichkeit ist ja alles noch viel komplizierter. In den Ovalen stehen die verschiedenen physikalischen Pro-

zesse, in den Rechtecken die Variablen des Modells, oben für die Atmosphäre, unten für den Untergrund. Die Pfeile zeigen, wie vielfältig alles miteinander gekoppelt ist. Das barotrope Modell beansprucht nur ein Eckchen links oben: den Wind in der 500 mb-Fläche und einen Teil der adiabatischen Prozesse. Das trockenere barokline 6-Flächen-Modell besetzt bereits den ganzen linken Teil: Temperatur, Diffusion und Reibung, die Rauhgigkeit des Erdbodens und der Wärmeaustausch mit der Atmosphäre kommen hinzu. Beim 9-Flächen-Modell ist endlich das volle Diagramm wirksam. Das wesentliche neue Element ist die Feuchte. Alles, was damit in Verbindung steht, kommt ebenfalls hinzu: Schichtwolken und Haufenwolken, Niederschlag daraus als Regen oder Schnee, Verdampfungs- und Schmelzprozesse, und nicht zuletzt die Strahlung, kurzwellig von der Sonne, langwellig vom Erdboden und der Atmosphäre.



Abb. 2: Physikalische Struktur des Vorhersagemodells.

Übrigens verbergen sich ganze Bündel von Problemen hinter jedem der physikalischen Prozesse. Sie laufen in kleineren „scales“ ab, welche vom Modellgitter bei weitem nicht aufgelöst werden. Betrachten wir als Beispiel die Konvektion. Praktisch ist es unmöglich, die Lebensgeschichte jeder einzelnen Cumulus-Wolke durchzurechnen. Als Ersatz- und Notlösung muß aus der bekannten Temperatur- und Feuchteschichtung ermittelt werden, ob es in einem Gitterquadrat überhaupt Haufenwolken geben kann. Gefragt wird nach ihrer Häufigkeit und Mächtigkeit, sowie nach der Rückwirkung, die sie in ihrer Gesamtheit auf das Temperatur- und Feuchtefeld ausüben. Ferner wird gefragt, wieviel Niederschlag aus den Wolken fällt, wieviel davon den Erdboden erreicht oder schon unterwegs wieder verdampft — alles

im Mittel über die Fläche des Gitterquadrates. Dafür müssen formelmäßige Ausdrücke gefunden werden, möglichst einfach und möglichst wirklichkeitsnah. Die Lösung ist leider alles andere als eindeutig. Auf eine Aussage, wann, wie und wo die Konvektion im Einzelnen abläuft, muß verzichtet werden. Das ganze Verfahren nennt man „Parametrisierung der Cumulus-Konvektion“. Analog müssen die anderen physikalischen Prozesse „parametrisiert“ werden, um sie rechnerisch im Modell unterzubringen.

Erst mit der Einführung der Feuchte ist der Schritt zur numerischen Wettervorhersage vollzogen worden. Zuvor konnte man nur indirekt aus dem Druck- und Temperaturfeld auf das eigentliche Wetter schließen. Jetzt sind etliche Elemente direkt zugänglich. Im täglichen Dienst werden sogenannte Meteogramme benutzt. Ein solches zeigt für einen einzigen Gitterpunkt, wie sich das Modell den Ablauf der nächsten 4 Tage vorstellt: die Winde und Temperaturen in mehreren Flächen, die Menge von hohen, mittelhohen und tiefen Wolken; Wettererscheinungen wie Regen, Schneefall, Schauer, Nebel; die Strahlungsflüsse und Wärmeflüsse am Erdboden, eine Luftdruckkurve, die Niederschlagssumme, den Bodenwassergehalt, eventuell Wachsen oder Schmelzen der Schneedecke.

Seit einigen Jahren besitzt unser feuchtes 9-Flächen-Modell einen kleinen Bruder mit der halben Maschenweite, etwa 125 km. Kleinere Strukturen wie z. B. Fronten, Niederschlagsgebiete, Gebirgeinflüsse werden mit der 4fachen Anzahl von Gitterpunkten besser dargestellt und entsprechend genauer vorhergesagt. Um den drastisch erhöhten Rechenzeitbedarf auszugleichen, wird nur in dem Teilgebiet Europa-Atlantik, in einem sogenannten „Nest“ gerechnet. Das Nest-Modell benötigt dafür ständig Informationen an seinem seitlichen Rand. Die erhält es vom nordhemisphärischen Achteck-Modell, von dem es dadurch abhängig ist.

Als Beispiel einer quantitativen Niederschlagsvorhersage des Nest-Modells sehen wir einen Fall von Mitte September mit viel Regen. Der erste Vorhersage tag (Abb. 3) zeigt ein Starkregengebiet quer über Belgien und Niedersachsen mit Mengen bis zu 50 Liter pro Quadratmeter, wie sie dann tatsächlich gemessen wurden. Am zweiten Vorhersage tag sollte das Regenband langsam nach Süden wandern und sich abschwächen. Gleichzeitig sollte starker Regen über den Westalpen fallen. Beides traf tatsächlich

recht gut ein. Vor 20 oder 30 Jahren hätten nicht einmal Optimisten solche Routine-Vorhersagen für möglich gehalten.

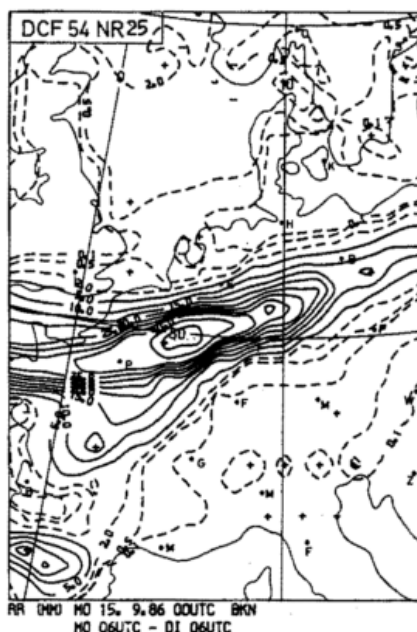


Abb. 3: Beispiel einer quantitativen Niederschlagsvorhersage.

Eine Darstellung des Korrelationskoeffizienten (Abb. 4) zeigt die allmähliche Verbesserung unserer Vorhersagen. Dieser Koeffizient ist ein Maß, welches die Ähnlichkeit der vorhergesagten mit den beobachteten Änderungen in einer einzigen Zahl ausdrückt. Die Obergrenze ist 1.0 und bedeutet absolute Übereinstimmung — unerreichbar auf immer und ewig! Wir sehen, wie sich die Vorhersagegüte (hier für 48 Stunden im

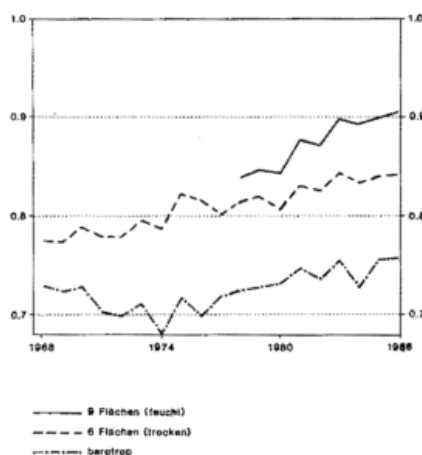


Abb. 4: Jahresmittel der Korrelationskoeffizienten 1968—1986

500-mb-Niveau) von barotrop über 6 Flächen trocken bis 9 Flächen feucht jedesmal um ein beträchtliches Stück verbessert. Im zeitlichen Ablauf von 1968 bis 1986 (letzteres eine Hochrechnung) gibt es gute und weniger gute Jahre. Es ist ein ansteigender Trend überlagert, welcher unsere Arbeit an den Modellen widerspiegelt. Bemerkenswert ist ein leichter Anstieg während der letzten 10 Jahre auch für das barotrope und das trockene 6-Flächen-Modell, an denen seither nichts mehr geändert wurde. Das muß an Verbesserungen des Beobachtungsnetzes und der Analysenmethode liegen.

### Blick in die Zukunft

Wir haben nun gesehen, wie die numerische Vorhersage aufkeimte, sich von einem mickerigen Pflänzchen zu einem stattlichen Baum entwickelte, der viele Früchte trägt. Wie wird es in Zukunft weiter gehen? Das ist mit wenigen Worten gesagt. Im nächsten Jahr erwarten wir einen Computer der jüngsten Generation mit phantastischer Leistung, dennoch weit entfernt von den Fähigkeiten des Laplace'schen Dämons. Wir werden die Beschränkung auf das nordhemisphärische Achteck los werden und voll global rechnen können, auf 15 bis 20 Flächen aufstocken, die horizontale Auflösung weiter verfeinern. Insbesondere wird ins globale Modell ein „Europa-Modell“ als „Nest“ eingebettet sein. In diesem können wir dann mit der Maschenweite auf 50 km herab gehen. Für manche karge Zweige im Astwerk der physikalischen Prozesse werden wir edle Reiser aufpfropfen. All dies kommt der täglichen Wettervorhersage zugute. Sie wird einerseits etwas weiter in die Zeit hinein reichen, andererseits im regionalen und kurzfristigen Bereich an Zuverlässigkeit und Schärfe gewinnen. Das Risiko gelegentlicher Fehlvorhersagen, welches die Beschäftigung mit dem Wetter so spannend macht, wird etwas kleiner, aber gewiß nicht Null werden. 20 Jahre numerische Wettervorhersage im Deutschen Wetterdienst: das ist sicher kein Grund zum Jubeln, aber ein wenig stolz darauf dürfen wir vielleicht doch sein.

## Aus der Weltorganisation für Meteorologie

### IMO-Preis für Prof. Dr. Hermann Flohn

Der bedeutendste internationale Preis, der für wissenschaftliche Leistungen auf dem Gebiet der Meteorologie verliehen wird, ist der International Meteorological Organization Prize (IMO-Preis). Die Weltorganisation für Meteorologie (WMO) verleiht ihn jährlich seit 1956 und hat ihn nach ihrer Vorgängerin, der International Meteorological Organization (IMO), benannt, in der noch nicht Staaten, sondern Wetterdienst- und Institutsdirektoren Mitglieder waren.



Dr. R. L. Kintanar, Präsident der WMO, überreicht Prof. Flohn (links) den IMO-Preis (Foto: U. E. Klopp)

Der jährlich einmal in Genf tagende Exekutivrat der WMO, dem auch der Präsident des Deutschen Wetterdienstes angehört, hat im Juni 1986 den 31. IMO-Preis Prof. Dr. Hermann Flohn zugesprochen. Der Preis besteht aus einer Goldmedaille, einem Geldbetrag von 1.200 US Dollar und einer Urkunde.

Der IMO-Preis wurde Prof. Flohn am 10. Oktober 1986 im Festsaal der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn durch den Präsidenten der Weltorganisation für Meteorologie, Dr. R. L. Kintanar, überreicht, der wie seine Vorredner: Dr. H. Reiser (Präsident des Deutschen Wetterdienstes), Prof. Dr. H. Georgii (Vorsitzender der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft) und Dr. G. O. B. Obasi (Generalsekretär der Weltorganisation für Meteorologie) die wissenschaftlichen Verdienste Prof. Flohns würdigte. In der Verleihungsurkunde

werden diese mit den Worten zusammengefaßt: „In recognition of his outstanding work in the field of atmospheric circulation and climatology, especially in relation to Africa and Asia, and his research into the history and modification of the global climate“.

Prof. Dr. Flohn ist erst der zweite deutsche

IMO-Preisträger. Vor ihm wurde Prof. Dr. R. Scherhag diese hohe Auszeichnung zuteil (1971). Die Liste der Preisträger enthält viele international bekannte Namen:

- |      |   |
|------|---|
| 1956 | 1. Preis Dr. T. Hesselberg                        |
| 1957 | 2. Preis Prof. C. G. Rossby                       |
| 1958 | 3. Preis Dr. E. Gold                              |
| 1959 | 4. Preis Prof. J. Bjerknes                        |
| 1960 | 5. Preis Prof. J. van Mieghem                     |
| 1961 | 6. Preis Prof. K. R. Ramanathan                   |
| 1962 | 7. Preis Dr. A. K. Angström                       |
| 1963 | 8. Preis Dr. R. C. Sutcliffe                      |
| 1964 | 9. Preis Dr. F. W. Reichelderfer                  |
| 1965 | 10. Preis Prof. S. Pettersen                      |
| 1966 | 11. Preis Prof. T. Bergeron                       |
| 1967 | 12. Preis Prof. K. J. Kondratyev                  |
| 1968 | 13. Preis Sir Graham Sutton                       |
| 1969 | 14. Preis Prof. E. Palmén                         |
| 1970 | 15. Preis Prof. R. Scherhag                       |
| 1971 | 16. Preis Prof. Jule G. Charney                   |
| 1972 | 17. Preis Academician V. A. Bugaev                |
| 1973 | 18. Preis Dr. C. H. B. Priestley und J. S. Sawyer |
| 1974 | 19. Preis Prof. J. Smagorinsky                    |
| 1975 | 20. Preis Dr. W. L. Godson                        |
| 1976 | 21. Preis Academician E. K. Federov               |
| 1977 | 22. Preis Dr. G. P. Cressman                      |
| 1978 | 23. Preis Dr. A. Nyberg                           |
| 1979 | 24. Preis Prof. H. E. Landsberg                   |
| 1980 | 25. Preis Dr. R. M. White                         |
| 1981 | 26. Preis Prof. B. Bolin                          |
| 1982 | 27. Preis Dr. W. J. Gibbs                         |
| 1983 | 28. Preis Prof. J. J. Burgos und M. F. Taha       |
| 1984 | 29. Preis Prof. T. Malone                         |
| 1985 | 30. Preis Sir Arthur Davies                       |
| 1986 | 31. Preis Prof. H. Flohn                          |

D. FRÖMMING

## Habilitationen, Promotionen und Diplom-Hauptprüfungen an den Universitäten in der Bundesrepublik Deutschland und in Berlin (West) im Jahre 1985

### — Teil 2 —

#### Universität (TH) Karlsruhe

##### Promotionen

ADRIAN, G.: Ein Initialisierungsverfahren für numerische mesoskalige Strömungsmodelle.

DORWARTH, G.: Numerische Berechnung des Druckwiderstandes typischer Geländeformen.

##### Diplom-Hauptprüfungen

HAGEN, M.: Eine Fallstudie über das Verhalten von Wolkenröpfchen und dynamischen Vorgängen in maritimen Cumuluswolken während KONTUR.

HAKENESCH, D.: Numerische Simulation der turbulenten Diffusion mit ortsabhängigen Diffusionskoeffizienten.

MATZERATH, C.: Modellmäßige Erfassung der Gesamtenergiebilanz über orographisch gegliedertem Gelände.

ZIMMERMANN, H.: Energieaustausch und Energiebilanz eines in einer Stadt befindlichen und durch Baukörper umschlossenen Luftvolumens.

---

## Universität Kiel

---

### Diplom-Hauptprüfungen

MANSCHKE, A.: Einfluß dünner Cirren auf den langwelligen Strahlungshaushalt der Atmosphäre.

v. RÜSTEN, CH.: Der Nettofluß langwelliger Strahlung an der Landoberfläche aus Messungen über einer klaren Atmosphäre.

STENGEL, M.: Analyse der meteorologischen Beobachtungen der Feuerschiffe Elbe 1 und Fehmarnbelt im Hinblick auf Sauerstoffzehrung in Nord- und Ostsee.

STORK, T.: Bestimmung der Landoberflächentemperatur aus Satellitendaten.

---

## Universität Köln

---

### Promotionen

HENNINGS, D.: Aerosol-Fernsondierung mittels Messung des Stokes-Vektors gestreuter Sonnenstrahlung.

KIRK, A.: Untersuchungen zur Allgemeinen Zirkulation im Weddell-Seegebiet (Antarktis).

PONATER, M.: Räumlich-zeitliche Entwicklung energetischer Parameter während blockierender Wetterlagen.

STUHLMANN, R.: Satellitenmessungen des Strahlungshaushaltes: Stichprobenentnahme und Zurückgewinnung der Strahlungsflußdichtfelder.

WIEGNER, M.: Bestimmung der Strahlungsbilanz am Oberrand der Atmosphäre über der Sahara aus Satellitenmessungen.

### Diplom-Hauptprüfungen

BARBULESCU, M.: Energie-Umwandlung von verfügbarer potentieller in kinetische Energie durch wandernde Wellen in 500 hPa im Winter.

FLEISCHER, R.: Messung des Temperatur-Strukturparameters in der untersten Grenzschicht über urbanem Gebiet mittels einer Fesselsonde.

GRATZKI, A.: Bestimmung der Globalstrahlung im Meßgebiet von METEOSAT.

RIELAND, M.: Bestimmung der Globalstrahlung aus Daten des Satelliten GMS.

SCHEIDGEN, P.: Die Behandlung der Turbulenz in einem zweidimensionalen Wolkenmodell.

---

## Universität Mainz

---

### Diplom-Hauptprüfungen

ALHEIT, R.: Numerische Modellrechnungen zur Abschätzung des Einflusses der Graupelbildung auf das Auswaschen von Aerosolpartikeln in kalten Wolken.

BORRMANN, ST.: Experimente zur Resuspension von Sandteilchen im Windkanal und Anwendung der Theorie der turbulenten Diffusion.

FRANCK, J.: Eichung eines kommerziellen Kaskadenimpaktors.

SCHMIDT, J.: Bestimmung des  $N_2O$  — und  $CH_4$  — Austauschs zwischen Boden und Atmosphäre in natürlichen Biotopen.

TRAUTMANN, TH.: Solarer Strahlungstransport in realistischen Atmosphären mit dreidimensionalen Wolkenfeldern.

---

## Universität München

---

### Habilitation

MAYER, H.: Baumschwingungen und Sturmgefährdung des Waldes.

### Promotion

HEIMANN, D.: Ein Dreischichten-Modell zur Berechnung mesoskaliger Wind- und Immissionsfelder über komplexem Gelände.

### Diplom-Hauptprüfungen

GEREKE, W.: Energiebilanz eines Gletscherbaches.

HUBER, I.: Überströmung einer Stadt am Beispiel von München.

KREMSE, H.: Langley-Methode zur Bestimmung der optischen Dicke des Aerosols: Fehlerquellen und Verbesserungsmöglichkeiten.

NEUREITHER, I.: Das Feuchtefeld in einem alpinen Endtal am Beispiel des Dischmats bei Davos.

TEGEN, A.: Berechnungen der Schadgasausbreitung über einer Stadt am Beispiel von München.

---

## Buchbesprechungen — Neuerscheinungen

---

ROCZNIK, K.: Wetter und Klima in Deutschland. Ein meteorologisches Jahreszeitenbuch mit aktuellen Wetterthemen. 2., erw. Aufl., Stuttgart: Hirzel 1986. 152 S., 24 Abb., 25 Tab., DM 24,00. ISBN 3-7776-0426-7.

Wenn ein Buch nach knapp vier Jahren in einer 2. Auflage erscheint, kann man daraus folgern, daß es „gut angekommen“ ist, gerne gekauft und gelesen wird, ja vielleicht sogar eine „Lücke“ geschlossen hat. So mag es sich auch mit dem vorliegenden Bändchen

verhalten, das jetzt in einer erweiterten Neuauflage vorliegt. Es soll nach den Worten des Autors Auskunft über den Witterungsablauf während des Jahres und einen Überblick über das Klima in Deutschland geben sowie wichtige Wettererscheinungen allgemeinverständlich beschreiben. Mit der Aufnahme eines neuen Kapitels über „Wetterstreß und heilendes Klima“ kommt der Autor dem Informationsbedürfnis der Leser entgegen.

Leider haften dem Buch auch Mängel an, die

nicht verschwiegen werden sollen. So fällt im Text und im Literaturverzeichnis auf, daß häufig veraltete Literatur zitiert wird. Das Zitat aus dem 19. Jahrhundert über die Wetterkunde (S. 11) entspricht nicht dem Stand der Wissenschaft in unserem Jahrzehnt, in dem die Wettervorhersage ohne Modellrechnungen nicht denkbar ist. Den Bauernregeln wird zuviel Gewicht beigemessen. Im Witterungsgeschehen interessieren mehr die Singularitäten und die Wahrscheinlichkeit ihres Eintreffens. Es gibt nur wenige Bauernre-

geln, die mit Singularitäten im Einklang stehen (z. B. Siebenschläfer und Eisheilige). Es ist auch wenig sinnvoll, eine 30 Jahre alte umstrittene Theorie im Zusammenhang mit den Luftmassen zu zitieren (S. 75).

Die Schwierigkeit der Langfristprognose wird im folgenden deutlich: auf S. 98 wird für 1983 ein zu trockener Hochsommer vorhergesagt, auf S. 135 (Tabelle) wird dieser Sommer als etwas zu naß eingestuft.

Der Hundertjährige Kalender gehört nicht in dieses Buch, weil er für die Wettervorhersage unbrauchbar ist. Ebenso anfechtbar sind einige Absätze in dem Kapitel über den Mondeinfluß.

Das interessante Buch sollte vor einer weiteren Auflage auf den neuesten wissenschaftlichen Stand — insbesondere bei der Darstellung der aktuellen Wetterthemen — gebracht werden.

H.-D. KIRCH

BATTAN, L. J.:

Weather. 2nd ed. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall 1985. V, 135 S. ISBN 0-13-947698-9

HASTENRATH, ST.:

Climate and circulation of the tropics. Dordrecht [u.a.]: Reidel 1985, XXII, 455 S. (Atmospheric Sciences Library; 8) ISBN 90-277-2026-6

CLIFT, G. A.:

Use of radar in meteorology. Genova: World Meteorol. Org. 1985 (Techn. Note No 181=WMO-No 625). IV, 90 S.

LYDOLPH, P. E.:

The climate of the earth. Totowa, NJ: Roman & Allanheld 1985. XV, 386 S. ISBN 0-86598-119-1

SHIMAZAKI, T.:

Minor constituents in the middle atmosphere. Tokyo: Terra Scientific Publ. Co; Dordrecht [u.a.]: Reidel 1985. XIII, 443 S. (Developments in earth and planetary sciences. Vol. 06.) ISBN 90-277-2107-6

WISPELAERE, C. de (Ed.):

Air pollution modeling and its application IV. Proc. of the 14 Int. Tech. Meeting on Air Pollution Modeling and its applica-

tion, hold Sept. 27—30, 1983, in Copenhagen. New York, London: Plenum Press 1985. XI, 818 S. (Nato challenges of modern society. Vol. 7) ISBN 0-306-41908-4

#### WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION:

Meteorological and hydrological aspects of siting and operation of nuclear power plants. Genova: World Meteorol. Org. 1985. XI, 151 S. (Techn. Note No 170 = WMO-No 550).

HASSE, L.; DOBSON, F.:

Introductory physics of the atmosphere and ocean. Dordrecht [u.a.]: Reidel 1986. VI, 126 S. ISBN 90-277-2139-4

MONIN, A. S.:

An introduction of the theory of climate. Dordrecht [u.a.]: Reidel 1986. VIII, 261 S. (Atmospheric Sciences Library. Vol. 7). ISBN 90-277-1935-7

PITTOCK, A. B. et. al.:

Environmental consequences of nuclear war. Vol. I: Physical and atmospheric effects. Publ. on behalf of the Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE) of the International Council of Scientific Unions (ICSU). Chichester, New York [u.a.]: J. Wiley & Sons 1986.

SCORER, R. S.:

Cloud investigation by satellite. Chichester: Ellis Harwood 1986 (ca. 250 S.) ISBN 0-85312-399-3

#### UMWELTBUNDESAMT

Atmosphärische Prozesse. Ausbreitungsmodelle einschließlich Luftchemie und Deposition. Beiträge z. IMA-Querschnittsseminar v. 22.—24. Januar 1986 im Berliner Reichstagsgebäude. Bd. 1.2. Berlin: Umweltbundesamt 1986. 721 S.

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI):

Ausbreitung von Emissionen aus Naturzug-Naß-Kühltürmen. Beurteilung von Kühlturmsauswirkungen. Düsseldorf: VDI-Verlag, Juni 1986. 15 S. (VDI 3784,

Bd. 1. VDI-Handb. Reinh. d. Luft. Bd. 1).

Meteorologische Messungen für Fragen der Luftreinhaltung. Globalstrahlung, direkte Sonnenstrahlung und Strahlungsbilanz. Düsseldorf: VDI-Verlag, Aug. 1986. 31 S. (VDI 3786, Bl. 5.) VDI-Handb. Reinh. d. Luft. Bd. 1).

ICSU/UNEP/WMO:

Report of the International Conference on the Assessment of the Role of Carbon Dioxide and of other Greenhouse Gases in Climate Variations and associated Impacts, Villach, Austria, 9—15 October 1985. Geneva: WMO 1986 (= WMO-No 661). 78 S. ISBN 92-63-10661-4

HARE, F. K.:

Climate variations, drought and desertification. Geneva: WMO 1985 (= WMO-No. 653). 35 S. ISBN 92-63-10-653-3

DAS, P. K.:

Monsoons. Fifth IMO-Lecture. Geneva: WMO 1986. XXIII, 155 S.

WHITTEN, R. C.; PRASAD, S. S. (Ed.):

Ozone in the free atmosphere. New York, N.Y.: Van Nostrand Reinhold 1985. XI, 288 S. ISBN 0-442-29207-4

SEINFELD, J. H.:

Atmospheric chemistry and physics of air pollution. New York, N.Y. [u.a.]: Wiley 1986. XXIII, 738 S. ISBN 0-471-82857-2

JAESCHKE, W. (Ed.):

Chemistry of multiphase atmospheric systems. Proc. of the NATO Advanced Study Institute on Chemistry of Multiphase Atmospheric Systems, hold on the Island of Corfu, Greece, Sept. 26.—Oct. 8. 1983. Berlin [u.a.]: Springer 1986. XVI, 773 S. (NATO ASI series, G: Ecological sciences, 6). ISBN 3-540-15647-X

WASHINGTON, W. M.; PARKINSON, C. L.:

An introduction to three-dimensional climate modeling. Oxford, New York: Oxford University Press 1986. XIV, 422 S. ISBN 0-19-855718-3

**Anschriften der Autoren**

(Thema des Heftes)

Dr. W. ATTMANNPACHER

Eibenweg 9

8922 Peiting

Prof. Dr. H. U. DÜTSCH

Kantstraße 11

CH-8044 Zürich

Dr. R. D. BOJKOV

Atmospheric Environment Service

4905 Dufferin Street

Downsview, Ontario M3H 5T4, Canada

U. KÖHLER

Meteorologisches Observatorium

Hohenpeißenberg

Albert-Schwaiger-Weg 10

8126 Hohenpeißenberg

Dr. C. L. MATEER

Atmospheric Environment Service

4905 Dufferin Street

Downsview, Ontario M3H 5T4, Canada

**Themen der Promet-Jahrgänge 1 (1971) bis 16 (1986)****Jg. 1 (1971)**

H. 1/2 Mikro- und Makroturbulenz

**Jg. 2 (1972)**

H. 1 Numerische Vorhersage

2 Satellitenmeteorologie I

3 Satellitenmeteorologie II

4 Wolkenphysik

**Jg. 3 (1973)**

H. 1 Das Barotrope Modell

2 Geschichte der meteorologischen

Strahlenforschung

3 Meßtechnik und Automation

4 Technoklimatologie

**Jg. 4 (1974)**

H. 1 Die Grenzschicht der Atmosphäre \*)

2 Medizinmeteorologie \*)

3 Instrumente und Methoden

4 Vorhersageprüfung

**Jg. 5 (1975)**

H. 1 Agrarmeteorologie heute

2 Die chemische Zusammensetzung  
der unteren Atmosphäre I \*)3 Die chemische Zusammensetzung  
der unteren Atmosphäre II4 GATE (Das tropische Experiment des Global  
Atmospheric Research Programme) I**Jg. 6 (1976)**H. 1 GATE (Das tropische Experiment des Global  
Atmospheric Research Programme) II

2 Die Allgemeine Zirkulation der Atmosphäre

3 Das Barokline Modell

4 Die Energetik der Allgemeinen Zirkulation der  
Atmosphäre**Jg. 7 (1977)**

H. 1 Radioaktivität der Atmosphäre

2 Lufterktrizität I

3 Lufterktrizität II

4 Klimaschwankungen

**Jg. 8 (1978)**

H. 1 Aktuelle Probleme der Flugmeteorologie

2/3 Anthropogene Klimamodifikation

4 Sturmfluten und Seegang I

**Jg. 9 (1979)**

H. 1 Sturmfluten und Seegang II

2/3 Zirkulationsmodelle

4 Stadtklima

**Jg. 10 (1980)**

H. 1/2 Klimamodelle

3 Klima und Planung I

4 Klima und Planung II

**Jg. 11 (1981)**

H. 1 Meso-scale Modelle

2/3 Transport und turbulente Diffusion  
von Luftbeimengungen4 Flugmeteorologische Probleme der planetarischen  
Grenzschicht**Jg. 12 (1982)**

H. 1/2 Synoptische Meteorologie heute.

Zentraler synoptischer Dienst

3/4 Biometeorologie

**Jg. 13 (1983)**

H. 1/2 Statistische Methoden der Klimatologie

3/4 Neuere Ergebnisse der Satellitenmeteorologie

**Jg. 14 (1984)**H. 1 Das Europäische Zentrum für mittelfristige  
Wettervorhersage (EZMW)

2/3 Maritime Meteorologie

4 Klima und Volkswirtschaft I

**Jg. 15 (1985)**

H. 1 Klima und Volkswirtschaft II

2/3 Strahlungstransporte in der Atmosphäre

4 Klimarelevante Spurenstoffe I

**Jg. 16 (1986)**

H. 1 Klimarelevante Spurenstoffe II

2/3 Hydrometeorologie

4 Ozon I

\*) vergriffen

**Manuskriptsendungen** werden erbeten an:

Deutscher Wetterdienst, Hauptschriftleitung „Promet“

Frankfurter Straße 135, D-6050 Offenbach