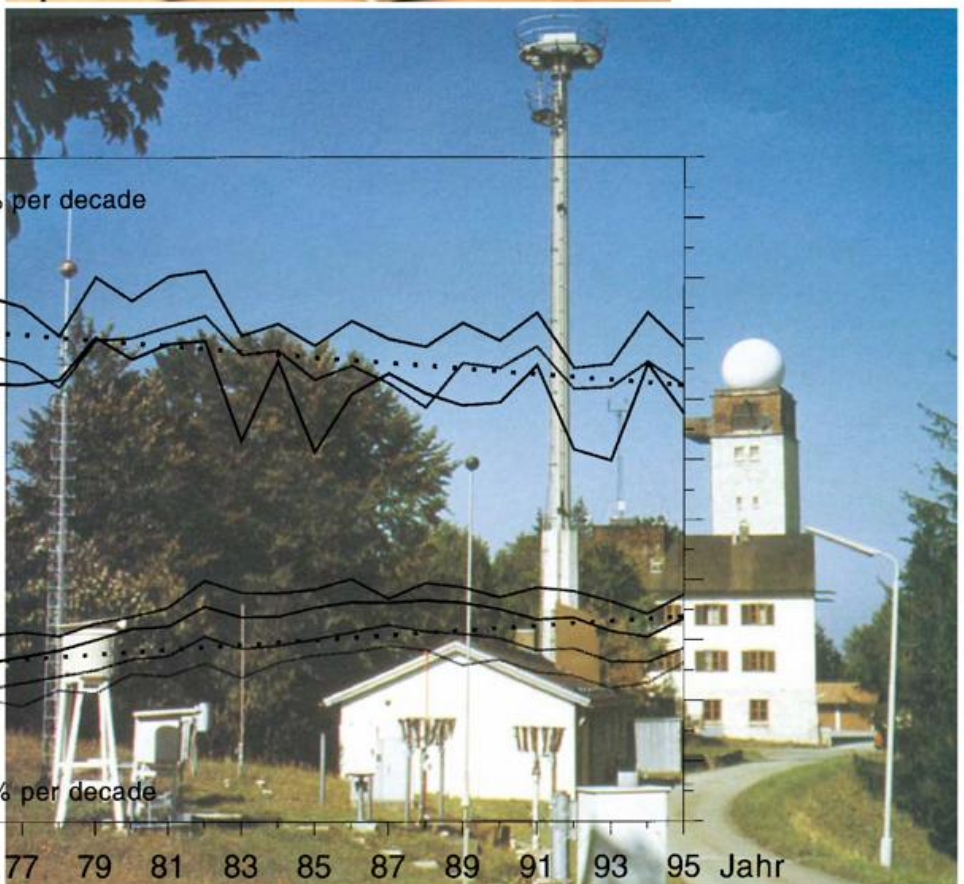
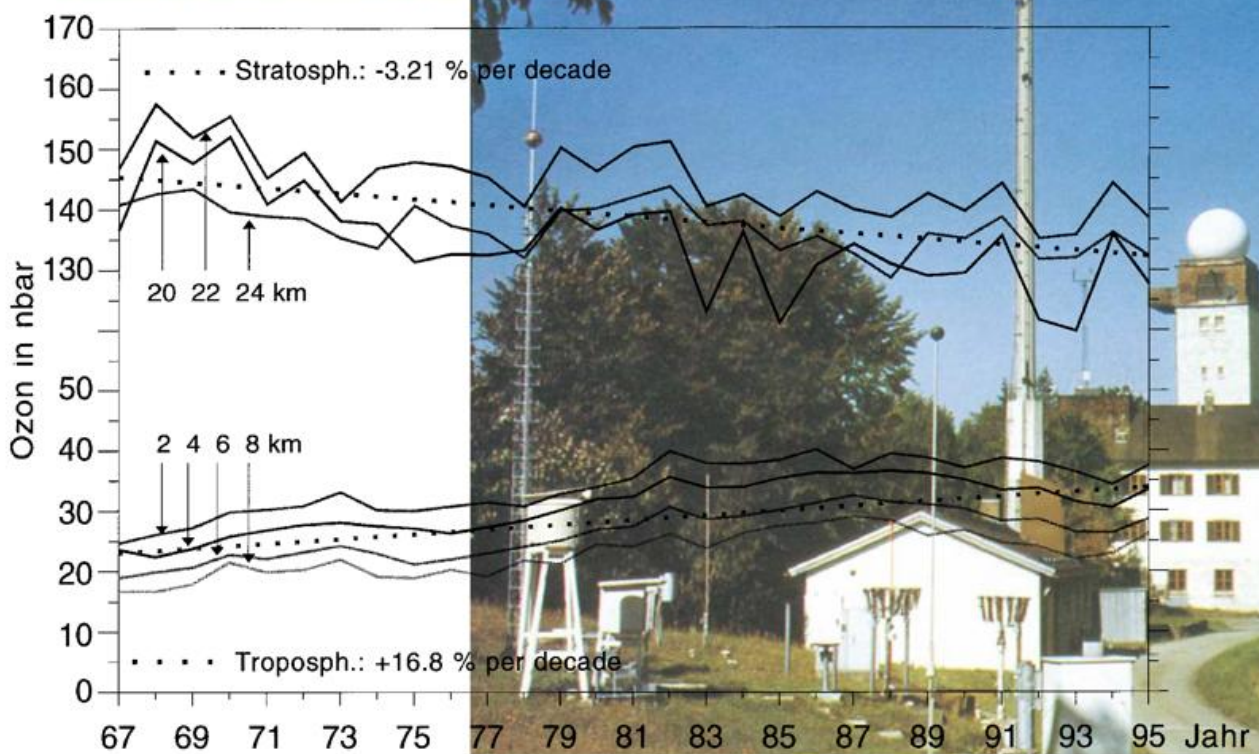
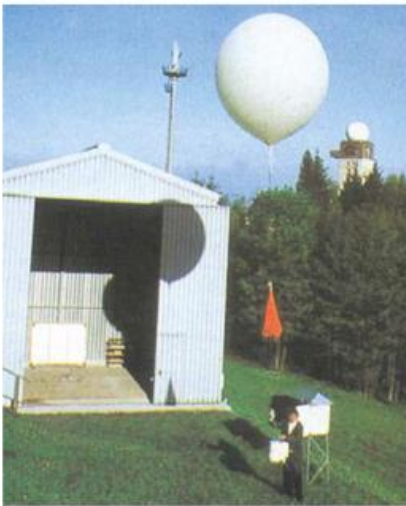




Das Meteorologische Observatorium Hohenpeißenberg I



Herausgeber
Deutscher Wetterdienst

Hauptschriftleiter
Dipl.-Met. H.-D. Kirch

Zum Titelbild:

Ansicht des Observatoriums Hohenpeißenberg mit dem Meßfeld (Wetterhütten, verschiedene Niederschlags-sammler, Blitzzähler) im Vordergrund, dem niedrigen Lidargebäude und dem Hauptgebäude mit Dach-Beobachtungs-plattform sowie Turm mit Radarkuppel. Darüber sieht man historische Instru-mente aus der Anfangszeit des Observa-toriums (1789) sowie einen Ozon-sondenstart. Die Grafik gibt einen Ein-druck von der langzeitigen Veränderung der Ozonschicht (s. a. Beitrag 6).

Meteorologische Fortbildung

25. Jahrgang, Heft 4, 1996

Thema des Heftes:

Das Meteorologische Observatorium Hohenpeißenberg I
(Fachliche Redaktion: P. Winkler, Hohenpeißenberg)

Beiträge	Seite
Zu diesem Heft	89
1 K. WEGE Zur Historie des Meteorologischen Observatoriums Hohenpeißenberg	90
2 P. WINKLER Auftrag und Organisation des Meteorologischen Observatoriums Hohenpeißenberg	99
3 H.-J. CLAUDE Das Ozonmeßprogramm am Hohenpeißenberg	104
4 U. KÖHLER Homogenisierung der langen Hohenpeißenberger Ozonreihen	109
5 W. STEINBRECHT Das Lidar am Hohenpeißenberg: Ein leistungsstarkes und vielseitiges Instrument für Langzeitmessungen in der Stratosphäre	116
6 H.-J. CLAUDE Ergebnisse der Ozonforschung am Meteorologischen Observatorium Hohenpeißenberg	126
Vorausschau – Tagungen	132

Thema des Heftes: Das Meteorologische Observatorium Hohenpeißenberg I

Zu diesem Heft

Erkenntnisfortschritt gründet sich auf die drei menschlichen Fähigkeiten: Wahrnehmung - Urteil - Schluß. Bewußtes Wahrnehmen von Naturvorgängen regt zum Nachdenken über den Vorgang an und führt zum Wunsch, das Gesehene und die Zusammenhänge zu verstehen: Der vernunftbegabte Mensch kommt zum Urteil. Ist der Vorgang verstanden, so läßt er sich durch eine Gesetzmäßigkeit oder bei komplexen Vorgängen durch ein Modell beschreiben. Die Schlußfolgerung (z.B. die Wetterprognose) kann bei Kenntnis der Zusammenhänge bis zu einem gewissen Grad dem Computer anvertraut werden.

Wo stehen die Observatorien in diesem Erkenntnisprozeß? An den Observatorien werden die beiden ersten Erfordernisse Wahrnehmung und Urteil in besonderem Maße gepflegt: Bestimmte Naturvorgänge werden mit besonderen Instrumenten beobachtet, Wissenschaftler beurteilen die Messungen und Phänomene aus fachlicher Sicht, sie entschlüsseln die Zusammenhänge mit der Meteorologie, beschreiben die Ursachen, die zu einem Naturvorgang führen und erarbeiten die zugehörigen Gesetzmäßigkeiten. Auch der dritte Schritt im Erkenntnisprozeß, die Schlußfolgerung, wird an Observatorien erarbeitet, jedoch hat er hier nicht den primären Rang, wird dieser Akt doch meist früher an den Universitäten oder anderen Forschungseinrichtungen erarbeitet. Aufgabe der Observatorien ist es eher wieder, die anderswo erarbeiteten Schlußfolgerungen anhand sorgfältiger Beobachtungen auf ihre Tragfähigkeit hin zu prüfen.

Die im 17. Jahrhundert einsetzende Geistesbewegung der Aufklärung hat im 18. Jahrhundert breite Schichten der Bevölkerung erfaßt. Hat man vorher die Natur lediglich wahrgenommen, so war jetzt das Bedürfnis zum Verstehen und Ergründen des Wahrgenommenen entstanden. Der immer stärker werdende Erkenntnisdrang ließ auch in dem bayerischen Churfürstlichen Bergrat von Lori (1723 - 1887) den Plan reifen, auf dem Hohenpeißenberg eine Sternwarte zu errichten, wovon er den Kurfürsten Max Joseph III überzeugen konnte und der daraufhin in einem Schreiben 1772 die Errichtung der Sternwarte befahl. Der Rottenbacher Probst Mösner (oder Mößmer), dessen Chorherren die Beobachtungen durchführen sollten, stellte damals bereits nüchtern fest: „... Es fehlen uns nicht Männer und Jünglinge, die für die modernen Studien sehr geeignet sind, es fehlt nicht am Willen, zu studieren, auch nicht allein an einem lobenswerten Eifer hierzu - wohl aber fehlt es an der gelegenen Zeit zum Studium“; also ein Problem, das die wissenschaftliche Forschung von ihren Anfängen an auf dem Hohenpeißenberg bis heute begleitet.

Von Lori schrieb 1775 übrigens folgendes Gedicht

Fort auf den Peißenberg
Da steigest Du auf Newtons Pfad
In der Natur geheimen Rath,
Wohin Dich nur die Meßkunst leitet:
Oh Meßkunst, Zaum der Phantasie,
Wer Dir folget, irret nie,
Wer ohne Dich will geh'n, der gleitet.

Der Nachfolger Max Josephs III, Kurfürst Karl Theodor, ließ dann 1781 anstatt der ursprünglich geplanten Sternwarte das Meteorologische Observatorium durch den Geistlichen Rat Jakob Hemmer errichten.

Erkenntnisdrang und Begeisterung für die Wissenschaft haben auf dem Hohenpeißenberg eine Tradition begründet, die auch durch manch schwierige Zeitumstände nicht erschüttert werden konnte. Diese Leitlinien mögen dem Observatorium weiterhin Stärke und Bestand verleihen.

Ein moderner Observatoriumsbetrieb beim DWD hat als wichtigstes Merkmal die Aufgabe, langfristig Untersuchungen auf speziellen Gebieten vorzunehmen, die einer ständigen wissenschaftlichen Begleitung bedürfen. In dieser Hinsicht unterscheiden sich Observatorien von anderen Monitoring-Stationen, die ebenfalls Dauermessungen durchführen. Dadurch gelingt es dem DWD, Daten von hoher Qualität zu erzeugen und, wegen der Ausrichtung der Meßreihen und Forschungsschwerpunkte auf besondere wissenschaftliche Fragestellungen, auch Ergebnisse von besonderer Einzigartigkeit zu erzielen. Wenn eine lange Kontinuität der Meßreihen gefordert ist, wie z.B. die Überwachung des schleichenden Abbaus der Ozonschicht zur Beantwortung der Frage, ob die getroffenen politischen Maßnahmen bereits zu einer Regeneration führen, läßt sich eine Antwort durch kurzfristige Forschungsprojekte nicht finden, denn es muß spezielles Fachwissen über einen langen Zeitraum mit besonderer Sorgfalt gepflegt werden.

In diesem und dem folgenden PROMET-Heft stellt sich das Observatorium Hohenpeißenberg vor. Es geht dabei nicht um eine erschöpfende Darstellung der in den letzten Jahren erzielten Ergebnisse (hierzu sei auch auf die früheren PROMET Hefte 4/86, 1,2/87 verwiesen) und die dazu gehörenden Arbeitsweisen, sondern es wird anhand ausgewählter Ergebnisse der Versuch unternommen, typische Fragestellungen, wie sie an einem Observatorium angegangen werden, aufzuzeigen, dann einen Einblick in das Instrumentarium zu vermitteln und schließlich zu zeigen, wie lange Datenreihen geprüft und bearbeitet werden müssen, damit daraus verlässliche Schlüsse gezogen werden können. Damit ist die Arbeit nicht erschöpft, lange Datenreihen sind wertvoll. Bei neuen Fragestellungen können sie in dieser Hinsicht bearbeitet werden, besonders, wenn es um langfristige Veränderungen der Atmosphäre und deren Ursachen geht. Der kontinuierlich wachsende Erfahrungsschatz der Mitarbeiter schlägt sich häufig genug in Geräteentwicklungen oder -verbesserungen oder zur Methodenentwicklung nieder. Beispiele hierzu sollen das Bild abrunden.

P. Winkler

1 Zur Historie des Meteorologischen Observatoriums Hohenpeißenberg

1 Einführung

Für den Nachweis von Klimaschwankungen sind lange und homogene Reihen von großer Bedeutung. Dies umso mehr, als wir jetzt offensichtlich am Beginn einer anthropogenen Klimaänderung größeren Ausmaßes stehen. Die jetzt etwa 215 Jahre lange Hohenpeißenberger Reihe, die weltweit längste einer Bergstation, ist deshalb sehr wichtig, weil in dieser Zeit auf dem Berg nur wenig verändert wurde, die Bedingungen zur Messung meteorologischer Größen haben sich kaum verändert. Dies ist bei anderen langen Reihen, die einen quantitativ nur schwer bestimmbareren Stadteinfluß aufweisen, nicht der Fall. Bis 1949 war der Hohenpeißenberg im wesentlichen eine Klima- (und synoptische) Station, der Fortsetzung der wertvollen Reihe verpflichtet. Nach der Gründung des Observatoriums 1950 wurde diese Verpflichtung beibehalten, denn die vornehmste Aufgabe eines Observatoriums ist, wie der Name besagt, die Beobachtung, d. h. auch die Schaffung langer homogener Reihen von Parametern, deren Messung einen besonderen Aufwand erfordern. Die Tradition bleibt also erhalten, wie beispielsweise die Hohenpeißenberger Ozonreihen zeigen. Daß man den Mühen und dem Idealismus unserer geistigen Vorfahren auch in jüngster Zeit sich bemühte, Rechnung zu tragen, soll dieser historische Überblick vermitteln.

2 Anfänge und Voraussetzungen

Im Jahre 1514 erbauten die um den Hohenpeißenberg wohnenden Bauern auf dem Gipfel des Berges eine Kapelle. Der herzogliche Pfleger von Schongau, Georg von Pienzenau, stiftete dieser Kapelle eine geschnitzte Muttergottes-Figur, die bald den Ruf eines „Gnadenbildes“ erlangte. (Diese spätgotische Figur ist noch heute in der Kirche zu sehen.) So entwickelte sich die Kapelle allmählich zur Wallfahrtskirche, und 1604 wurde von Herzog Maximilian I. dem nahe gelegenen Augustiner-Chorherrenstift Rottenbuch die Wallfahrtsseelsorge übertragen. 1616-19 wurde östlich der Kapelle eine neue Kirche mit Turm und Wohnhaus für die Priester gebaut.

Ende des 17. Jahrhunderts setzte die Zeit der Aufklärung ein, die das ganze 18. Jahrhundert beherrschte. Die Vernunft wurde zum verpflichtenden Lebensinhalt erhoben. Der Kreis der naturwissenschaftlich Interessierten erweiterte sich, durch Beobachtung und Experiment wurden die neuen naturwissenschaftlichen Erkenntnisse begründet, die unser heutiges naturwissenschaftliches Weltbild geformt haben. Als prägende Persönlichkeiten sind hier u. a. zu nennen: Kant als Naturphilosoph; Newton, Leibniz, Bernoulli, Euler, Laplace als Mathematiker und Physiker. In dieser Zeit wurden auch die Grundlagen für die Messung atmosphärischer Parameter geschaffen. In diesem Zusammenhang sind

insbesondere von Guericke, Toricelli, Pascal, Boyle, Fahrenheit, Réaumur, Celsius und Saussure hervorzuheben.

Nun waren zu damaliger Zeit die Wissenschaften, auch die Naturwissenschaften, vielfach in den Klöstern zu Hause. (Zu nennen ist hier vor allem das berühmte Kloster Kremsmünster.) Die Theologen absolvierten häufig ein weiteres Studium, und die Kirche bot wesentliche Bildungsmöglichkeiten. So wurden von den Augustiner-Chorherren bereits 1758/59 auf dem Hohenpeißenberg meteorologische Beobachtungen durchgeführt, für die sich allerdings kaum jemand interessierte. Auf Anregung von Johann Georg von Lori, dem Begründer der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, sprach 1772 Kurfürst Maximilian III. Joseph von Bayern den Wunsch aus, daß vom Stift Rottenbuch auf dem Berg eine Sternwarte eingerichtet werden solle. Mit Unterstützung des nahe gelegenen Klosters Polling wurde die Planung hierfür vorangetrieben, Fachbücher und Instrumente gekauft, darunter ein Spiegelteleskop (observatorium portable) des berühmten Augsburger Mechanikers und Physikers Georg Friedrich Brander, das heute noch im Observatorium vorhanden ist. Auf dem Dach des Priesterwohnheims wurde eine Plattform errichtet, die später den meteorologischen Beobachtungen diente. – Durch das Ableben des Kurfürsten Maximilian III. und Querelen innerhalb der Bayerischen Akademie der Wissenschaften wurde der Plan einer Sternwarte dann doch nicht verwirklicht. Jedoch war hierdurch das Interesse für eine wissenschaftliche Betätigung und die Bereitschaft für die spätere Durchführung kontinuierlicher meteorologischer Beobachtungen geweckt worden.

3 Hohenpeißenberg als Station im Netz der Societas Meteorologica Palatina, 1781 – 1795

Nachfolger von Maximilian III. wurde 1778 Karl IV. Philipp Theodor von der Pfalz; dabei wurde die Kurpfalz mit Kurbayern vereinigt. Karl Theodor brachte den Wissenschaften und schönen Künsten großes Interesse entgegen und förderte sie entsprechend. In der pfälzischen Residenz Mannheim waren neben der Wissenschaft eine moderne Architektur, Bildhauerei und Malerei, Theater und Musik zu Hause, so daß Mannheim seinerzeit das pfälzische Florenz genannt wurde. Karl Theodor gründete 1763 die Pfälzische Akademie der Wissenschaften (*Academia Electoralis Scientiarum et Elegantiorum Liberarum Theodori Palatina*). 1780 stiftete er die Societas Meteorologica Palatina, die Pfälzische Meteorologische Gesellschaft, als meteorologische Klasse der Akademie der Wissenschaften.

Das wesentliche Ziel dieser Gesellschaft war die Errichtung eines ersten internationalen meteorologischen Beobachtungsnetzes. Dieses Netz wurde bereits am

1.1.1781 eingerichtet und reichte letztendlich von Amerika über Grönland bis zum Ural, von Skandinavien bis zum Mittelmeer. Es umfaßte 39 Stationen, eine davon war von Anfang an der Hohenpeißenberg, so daß dieses Datum die Geburtsstunde des Observatoriums ist.

Sekretär der Gesellschaft wurde der Mannheimer Hofkaplan und Physiker Johann Jakob Hemmer, ein außerordentlich begabter und weitsichtiger Wissenschaftler und Organisator. Hemmer war der *spiritus rector* der Gesellschaft und ihres internationalen Beobachtungsnetzes. Dieses Netz arbeitete nach modernen Gesichtspunkten. Es wurden einheitliche Instrumente verwendet, die in Mannheim gefertigt wurden, die komplizierteren in Augsburg bei Brander. Es wurde eine einheitliche Beobachteranleitung benutzt, die Hemmer selbst geschrieben hatte. Hemmer setzte auch einheitliche Beobachtungstermine nach mittlerer Ortszeit durch, und zwar 7, 14 und 21 Uhr, die sogenannten „Mannheimer Stunden“, mit denen sich die Tagesmitteltemperatur recht genau berechnen läßt und die heute noch im Klimadienst verwendet werden. Schließlich sorgte er für die rasche und einheitliche Veröffentlichung der Beobachtungen in den „*Ephemerides Societatis Meteorologicae Palatinae*“. Zum ersten Male wurden damit meteorologische Beobachtungen verschiedener Stationen wirklich vergleichbar, und die von Hemmer eingeführten o.g. vier Grundvoraussetzungen für ein Beobachtungsnetz gelten auch heute noch. – Im Jahre 1820 führte Brandes in Leipzig die ersten synoptischen Untersuchungen mit den Daten der *Societas Meteorologica Palatina* durch.

In München schuf Karl Theodor in der dortigen Akademie eine Abteilung für Meteorologie und bestimmte, daß statt der liegengelassenen Pläne für ein astronomisches Observatorium wegen der dafür günstigen Lage auf dem Hohenpeißenberg ein meteorologisches Observatorium einzurichten sei, das, wie bereits erwähnt, in das geplante Netz der Pfälzischen Gesellschaft eingliedert wurde. Im Herbst 1780 kam Hemmer nach Rottenbuch, um den dortigen Professor Fischer zu instruieren und die Instrumente auf dem Hohenpeißenberg aufzustellen. Er brachte auch den ersten Blitzableiter an der Kirche an. (Hemmer hat den Blitzableiter in Europa eingeführt.)

Professor Fischer siedelte zum Hohenpeißenberg über und begann am 1.1.1781 mit den Beobachtungen. Neben den meteorologischen wurden auch erdmagnetische Messungen und phänologische Beobachtungen durchgeführt. Wegen einer Berufung nach München als Professor für Physik und Mathematik mußte er die Beobachtungstätigkeit bereits im Oktober 1781 aufgeben. Bis 1785 waren zwei weitere Augustiner Chorherren tätig, Guarinus Schlögl und Herkulan Schwaiger. Anfang 1785 wurde der Chorherr Albin Schwaiger berufen, der nun mehr als 10 Jahre, nämlich bis Mitte 1796, auf dem Hohenpeißenberg tätig war. – Er veröffentlichte 1792 die erste Klimatologie des Hohenpeißenbergs unter dem Titel „Versuch einer meteorologischen Beschreibung des hohen Peißenbergs als eine nötige Beilage zu

dessen Prospektskarte“, wobei er die Beobachtungen von 1781 – 1791 verwendete. Er hatte während seiner Tätigkeit auf dem Hohenpeißenberg tiefgreifende und der Zeit weit vorausseilende Erkenntnisse gewonnen und schreibt u.a.: „Freylich scheint es bey dem ersten Anblicke so vieler und mannigfaltiger Erscheinungen, die sich in der Atmosphäre ereignen, unmöglich zu seyn, jemals in diesem Labyrinth einen Ausgang zu finden; unglaublich, bey so vielen Kräften in der Natur, die sich so mannigfaltig verändern, und unter unendlich verschiedenen Umständen wirken, eine Wahrheit oder Regel festsetzen zu können“. Er kommt dann zu dem Schluß, daß, wenn man erst einmal viele Beobachtungen habe und genügend verglichen und geforscht habe, man „es in der Folge der Zeit so weit bringen (würde), daß man die Hauptveränderungen der Witterung mit Zuverlässigkeit und einer physischen Gewißheit voraussagen und bestimmen kann“. Er hatte des weiteren die Erkenntnis, daß ein zehnjähriger Beobachtungszeitraum lange nicht hinreichend sei, das Klima eines Ortes richtig zu beschreiben.

Die Station befand sich (bis 1936!) in einem Zimmer im 2. Stock an der Nordseite des Priesterwohnhauses, in dem sich u.a. Quecksilberbarometer, Deklinatorium und Inklinatorium befanden. Vor einem Flurfenster war eine Fensterhütte angebracht, die Thermometer und Hygrometer enthielt. Auf der Plattform über dem Dach des Wohnhauses befanden sich u.a. ein Regenmesser mit quadratischer Auffangfläche, ein Schneemesser und eine Windfahne. Wegen der Aufstellung auf dem Dach sind die Niederschlagsmessungen aus dieser Zeit leider nicht verwertbar.

Im Jahre 1790 starb Hemmer, und damit die treibende und integrierende Kraft der *Societas Meteorologica Palatina*. Die Zahl der Stationen wurde von Jahr zu Jahr geringer. Zwar konnte sein Nachfolger Gütthe noch bis zum Jahr 1795 die *Ephemeriden* herausgeben, so daß schließlich 12 Bände der Jahre 1781 – 92 vorlagen, doch brachte die kritische Finanzlage des Kurfürsten die wissenschaftlichen Aktivitäten zum Erliegen. Während der Belagerung Mannheims im französischen Revolutionskrieg wurde das Schloß 1795 durch österreichische Artillerie beschossen und das sogenannte physikalische Kabinett zerstört. Dies war auch das endgültige Ende der *Societas Meteorologica Palatina*.

4 Ende der Societas Meteorologica Palatina bis zur Säkularisation, 1795 – 1803

Nach Auflösung der Mannheimer Gesellschaft entschlossen sich Albin Schwaiger und der Probst des Rottenbacher Stifts, Ambrosius Mösner, trotz fehlender Mittel die Beobachtungen weiterzuführen. Ihr wissenschaftliches Interesse gab hierfür den Ausschlag. Schwaigers Nachfolger (Schwaiger wurde als Pfarrvikar nach Oberammergau versetzt) wurde 1796 der Chorherr Gelasius Karner. Er führte bis 1804 die Beobachtungen und Berichte gewissenhaft weiter, obwohl die Münchener Akademie kein Interesse daran zeigte.

5 Übergangszeit, 1803 – 1806

Während der Säkularisation wurden das Stift Rottenbuch und die Wallfahrt auf dem Hohenpeißenberg enteignet, der Konvent der Chorherren aufgelöst. Zwei der Chorherren durften auf dem Berg bleiben: Karner für das Observatorium, Primus Koch als Seelsorger und Lehrer der Schule. Beide erhielten eine kärgliche Pension, nagten als hochgebildete Theologen und Wissenschaftler quasi am Hungertuche und mußten die Ausgaben für das Observatorium, sogar Papier wurde nicht zur Verfügung gestellt, selbst tragen. Die Regierung zeigte keinerlei Interesse für Kirche, Schule und Observatorium. Unter diesen Bedingungen und wegen einer Magenkrankung gab 1804 Karner auf und verließ den Hohenpeißenberg. Nun war Koch auf sich allein gestellt. Unter kärglichsten Bedingungen beobachtete er unermüdlich weiter, getrieben von dem Bewußtsein, daß die vorangegangenen mehr als 20 Jahre sorgfältigster ununterbrochener Beobachtungen nicht umsonst gewesen sein sollten. Er machte Eingaben an die Akademie der Wissenschaften und an die Königlich Bayerische Landesdirektion und legte seine Sorgen um den Fortbestand des Observatoriums dar. – Im Jahre 1805 war ihm ein Teilerfolg beschieden, auf dem Berg wurde von der Regierung eine Pfarrei Hohenpeißenberg genehmigt, Koch wurde der erste Pfarrer. Er führte die Beobachtungen weiter wie auch die Bemühungen, den Hohenpeißenberg als Observatorium zu erhalten.

6 Beobachtungen durch Pfarrer und Lehrer, 1806 – 1936

Endlich übernahm 1806 die Bayerische Akademie der Wissenschaften in München die Verpflichtung, für die Weiterführung des Observatoriums zu sorgen. Der Pfarrer, also Koch, wurde zum Observator ernannt, der Lehrer sollte jeweils sein Gehilfe bzw. 2. Observator sein. Um die Angelegenheit voranzutreiben, überrumpelte Koch die Behörden in München und stellte Johann Georg Schmautz als Schulgehilfen und 2. Observator an; er wurde dann auch als Lehrer anerkannt. Auf eine Vergütung für die Beobachtertätigkeit mußten sie allerdings noch lange warten; erst 1809 wurde verfügt, daß „dem Pfarrer Primus Koch, so lange er die dortigen meteorologischen Observationen fortsetzt, jährlich 20 Klafter halb harten, halb weichen Holzes, und dem dortigen Schullehrer als seinem Gehilfen dieses Instituts jährlich 5 Klafter weichen Holzes...bewilligt werden“. Also eine Vergütung in Naturalien! Koch verrichtete seine Dienste bis zu seinem Tode 1812. Schmautz war 2. Observator bis 1848 und ging seinen Beobachterpflichten noch als fast Neunzigjähriger nach!

Die Regelung, Pfarrer = 1. Observator, Lehrer = 2. Observator wurde beibehalten und hat sich bis 1936, also 130 Jahre lang, bewährt! – 1838 wurde die Station der Sternwarte München unterstellt. Zu erwähnen sei hier vor allem J. von Lamont, der sich besonders um den Hohenpeißenberg kümmerte und die gewonnenen Daten bearbeitete.

1878 wurde in München die Meteorologische Zentralstation, die spätere Bayerische Landeswetterwarte, gegründet, die ein staatliches Beobachtungsnetz aufbaute und sich zu einem bayerischen Wetterdienst entwickelte. Der Hohenpeißenberg wurde in dieses Netz einbezogen und mit einheitlich eingeführten Instrumenten (fast 100 Jahre nach dem Palatina-Netz!) einer Klimastation ausgerüstet. Ab 17.12.1878 wurde nach deren neuen Instruktionen beobachtet. Um Vergleiche mit der Umgebung anzustellen, wurde 1891-95 in Bad Sulz am Fuße des Hohenpeißenbergs, anschließend in Schongau eine Station eingerichtet. 1901 kam eine Regenstation in Oderding hinzu. Ab 1910 wurden die Beobachtungen am Hohenpeißenberg erweitert und durch die Registrierung von Temperatur, Feuchte und Wind ergänzt. – Die am Observatorium gewonnenen Daten wurden u.a. von J. v. Hann, A. Schmauß und L. Weickmann bearbeitet.

7 Reichswetterdienst, 1934 – 1945

1934 wurde die Station von dem neu gegründeten Reichswetterdienst übernommen, ohne daß sich zunächst viel änderte. Weiterhin waren Pfarrer und Lehrer die Observatoren. Mit der Einrichtung eines Netzes für die Flugsicherung wurden ab 1936 auch synoptische Beobachtungen angestellt. Dies setzte einige Veränderungen voraus: Die Station wurde endlich mit einem hauptamtlichen Beobachter besetzt, sie zog in das ca. 100 m östlich des Pfarrhauses gelegene Berggasthaus um (das übrigens Mitte Februar 1990 während eines NW-Sturmes so schwer beschädigt wurde, daß es abgerissen werden mußte), im Pfarrgarten wurde eine Englische Hütte aufgestellt und auf dem Dach des Pfarrhauses ein Böenschreiber und ein Sonnenscheinautograph (1937) installiert. – Die Arbeitsbedingungen wurden wesentlich verbessert, als die Station 1940 ein neu errichtetes Gebäude zusammen mit einer Außenstelle des Flugfunk-Forschungsinstituts Oberpfaffenhofen (FFO) beziehen konnte. Dieses Gebäude liegt am westlichen Ende des Gipfels nur wenige Meter unterhalb der höchsten Erhebung inmitten eines größeren, jetzt zum Observatorium gehörenden Areals.

Das FFO stand unter Leitung von M. Dieckmann. Seit Kriegsbeginn wurden die Forschungsschwerpunkte des Instituts auf kriegswichtige Verfahren gelegt, die militärischer Geheimhaltung unterlagen (Dieckmann 1941). Am Observatorium liegen daher keine Unterlagen mehr zu den Arbeitsgebieten vor, vorhandene wurden wohl seinerzeit von den amerikanischen Truppen beschlagnahmt. Dem in Porz-Wahn befindlichen historischen Archiv der Luftfahrt konnte entnommen werden, daß die Außenstelle Hohenpeißenberg wegen ihrer hohen Lage mit freier Sicht für die Zentimeter- und Dezimeterwellenforschung vorgesehen war; dies findet quasi seine Fortsetzung in der heutigen Wetterradarforschung. Desweiteren wurden die elektrischen Reflexionseigenschaften verschiedener Flugzeugtypen im Hinblick auf ihr Verhalten gegen Flugzeugsuchgeräte untersucht und luftelektrische Messungen durchgeführt

(ZETZMANN 1963). Seitens des Wetterdienstes betrieb auch H. Israel 1944/45 lufterlektrische Forschung, er suchte nach Zusammenhängen zur atmosphärischen Turbulenz.

Leiter der synoptischen Station war seit 1944 H. Leiderer. Zum Kriegsende wurde der Berg unter Artilleriebeschuss genommen, angeblich ausgelöst durch ein Licht im Turm des Observatoriums. Andere Quellen nennen als Ursache Widerstandsnester von SS-Truppen um den Berg herum. Das Observatorium wurde nicht getroffen, allerdings die Kirche; weiterer Schaden entstand wohl nicht, lediglich ein Reh wurde getötet, in damaliger Zeit ein willkommenes Zubrot für die Bewohner des Berges.

Mit dem Beschuss wurden ab 28.4.1945 die Beobachtungen lückenhaft und setzten ab 2.5. ganz aus. Die Besetzung des Berges zunächst durch französische, dann durch amerikanische Truppen erfolgte problem- und kampfflos.

8 Interregnum, 1945 – 1946

Zum Kriegsende versah das Ehepaar Leiderer den Beobachtungsdienst. Da die Besatzungsmacht für die Flugsicherung an den Beobachtungen sehr interessiert war, wurde Frau B. Leiderer beauftragt, diese weiterhin durchzuführen. Sie wurden bereits am 14.5. wieder aufgenommen. Frau Leiderer war bis zur Übernahme der Station durch den neu gegründeten Wetterdienst in der US-Zone am 1.4.1946 offiziell als alleinige Beobachterin tätig.

9 Wetterdienst in der US-Zone bis zur Umwandlung in ein Observatorium, 1946 – 1950

Am 1.4.1946 wurde die Station in den „Wetterdienst in der US-Zone“ eingegliedert und dem späteren Wetteramt München unterstellt.

9.1 Zeitraum 1946 – 1947 (H. BICHLMAIER)

Die Leitung hatte zunächst der Wetterdiensttechniker H. Bichlmaier. Die Dienststelle arbeitete als synoptische Station und als Klimastation I. Ordnung. Am 1.8.1946 wurde eine Gewitterbeobachtungs- und Warnstelle eingerichtet, die H. Lueder bis März 1950 leitete. Er arbeitete auch an lufterlektrischen Fragestellungen.

9.2 Zeitraum 1947 – 1950 (H. WEICKMANN, F. HÖHNDORF)

Ab April 1947 leitete die Station H. Weickmann. Er spürte die verschollenen Hohenpeißenberger Daten von 1865-1878 im Archiv der Münchener Sternwarte auf, so daß seitdem die Reihe nahezu geschlossen vorliegt. Er untersuchte sie auf Singularitäten in der Temperatur (WEICKMANN 1948). Er führte erste Ozonmessungen durch und beschäftigte sich vor allem mit wolkenphysikalischen Arbeiten, die die Grundlage für seine späteren Untersuchungen in den USA bildeten, wohin er 1949 gegangen war. Durch diese Arbeiten wur-

de H. Weickmann international bekannt. Nach seinem Ausscheiden übernahm F. Höhndorf kommissarisch die Leitung der Station; er befaßte sich mit strömungsphysikalischen Fragen.

10 Hohenpeißenberg als Meteorologisches Observatorium, ab 1950

Im März 1950 wurde die Bergstation in ein Meteorologisches Observatorium umgewandelt und dem Zentralamt des Wetterdienstes in der US-Zone in Bad Kissingen direkt unterstellt, später nach Schaffung des Deutschen Wetterdienstes im Jahre 1952 dem Zentralamt in Offenbach. Wenn auch schon seit 1946 wieder Forschung betrieben wurde, so wurden jetzt Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur wesentlichen Aufgabe. Diese wissenschaftliche Forschung wurde in der Folge und bis heute von Institutionen außerhalb des Wetterdienstes finanziell unterstützt, anfangs von amerikanischer Seite, später vor allem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft, dem Bundesminister für Forschung und Technologie und der Bayerischen Staatsregierung. Daneben waren – als typische Observatoriumsaufgabe – kontinuierliche Langzeitbeobachtungen durchzuführen, die eine wissenschaftliche Begleitung erfordern. Die Beobachtungstätigkeit einer Wetterstation blieb weiter bestehen, abgesehen von einer vorübergehenden Ausgliederung derselben von 1964 bis 1977. Der Beobachtungsumfang verdichtete sich im Laufe der Zeit sowohl hinsichtlich der Frequenz als auch der Parameter.

10.1 Zeitraum 1950 – 1967 (J. GRUNOW)

Nach der Aufwertung der Dienststelle zu einem Observatorium wurde zunächst ein Forschungsprogramm aufgestellt, wobei der Schwerpunkt bei Strahlungs- und geländeklimatologischen Untersuchungen lag. Weitere Arbeitsgebiete waren die Fortsetzung der Gewitteruntersuchungen, meteorologisch-photographische Studien, Auswertung und Prüfung der Hohenpeißenberger Reihe, Untersuchungen zum Niederschlag sowie anderer den Wasserhaushalt bestimmende Größen sowie das Studium von Eiskristallen.

10.1.1 Strahlungsuntersuchungen

Der Schwerpunkt lag bei der Sonnenscheindauer und bei der Globalstrahlung, zumal hier schon längere Reihen (seit 1937 bzw. 1948) vorlagen. (Von Januar 1948 bis September 1951 wurde für Strahlungsmessungen allerdings der Pyranograph nach Robitzsch eingesetzt, erst danach das Pyranometer nach Moll-Gorczyński.) Es wurde eine umfangreiche klimatologische Untersuchung mit Durchschnitts- und Häufigkeitswerten durchgeführt; Vergleiche mit anderen Stationen zeigen, daß sich im Jahres- und Tagesgang durch die Höhenlage im Alpenvorland bedingte Besonderheiten ergeben. Es wurden Beziehungen zur Himmelsbedeckung, zur Großwetterlage und zum Niederschlag bestimmt. Als Beispiel ist der Jahresgang der Sonnenscheindauer für

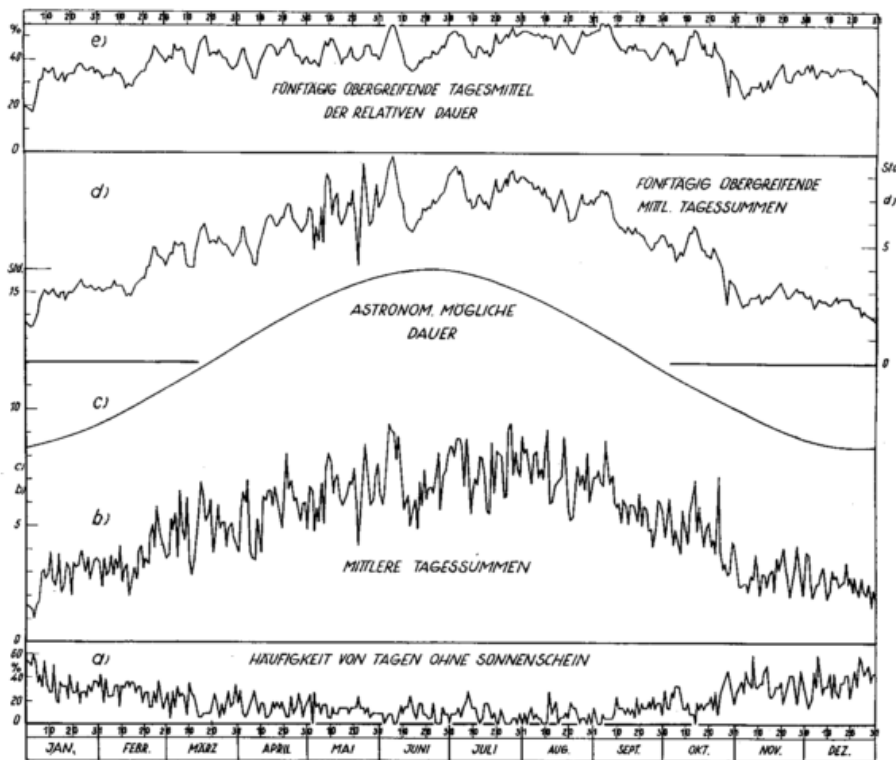


Bild 1: Jahresgang der Sonnenscheindauer nach mittleren Tagessummen (1937 – 1959)
Aus: GRUNOW 1962

1937-59 in Bild 1 wiedergegeben (GRUNOW 1962). Auf zwei Singularitäten sei hier hingewiesen: Einmal der Abfall am Jahresende bis zu dem absoluten Minimum am 3. Januar. Diese Sonnenscheindropung geht einher mit dem den Hochwinter einleitenden Kälterückfall, der von einem Häufigkeitsmaximum zyklonaler Ost- und Nordost-Lagen begleitet ist und Staubewölkung am Alpenrand bedingt. Dies ist in Übereinstimmung mit dem 50jährigen Häufigkeitskalender der Nebelfrostablagerungen auf dem Hohenpeißenberg (Maximum in der ersten Januarpentade). Eine weitere markante Singularität ist durch den Einbruch des europäischen Sommermonsuns bedingt. Im 5tägig übergreifenden Mittel ergibt sich ein Minimum Mitte Juni und ein zweites in der 2. Julipentade. Diese regenreichen und wechselhaften Witterungsabschnitte zeigen sich auch bei Temperatur, Bewölkung, Niederschlag und, wie die späteren Messungen zeigen, bei der Globalstrahlung. Die Vergleiche zur Temperatur wurden nach Untersuchungen von H. WEICKMANN (1948) angestellt, später berechnete Pentadenwerte der Lufttemperatur (ANIOL 1981) bestätigen diese Singularität eindrucksvoll (Bild 2).

Es wurden auch Beziehungen zwischen relativer Sonnenscheindauer und Tagessummen der Globalstrahlung untersucht und frühere Arbeiten von Ångström kritisch gewertet. Dies war sehr wichtig, da allgemein Sonnenscheindauern länger und häufiger sind als Reihen der Globalstrahlung. 1953 wurde auch die Messung der diffusen Himmelstrahlung aufgenommen, woran sich Arbeiten zum Anteil von direkter Sonnenstrahlung und diffuser Himmelstrahlung an der Globalstrahlung mit Rückschlüssen auf die Trübung anschlossen. Die Global- und Himmelstrahlung ist auch bei verschiedenen Hangneigungen sowie spektral gemessen worden, des-

weiteren die lang- und kurzweilige Strahlungsbilanz. Diese speziellen Messungen wurden besonders im Jahr der ruhigen Sonne und im Internationalen Geophysikalischen Jahr durchgeführt.

Da am Observatorium in Hamburg ein Schwerpunktstrahlung eingerichtet war, wurden die Untersuchungen am Hohenpeißenberg später beendet, die kontinuierlichen Messungen von Global- und Himmelstrahlung jedoch weitergeführt und in das Strahlungsmeßnetz eingebracht.

10.1.2 Geländeklimatologische Untersuchungen

Der Hohenpeißenberg mit seinen etwa mit 30° nach Norden und Süden geneigten Hängen ist für geländeklimatologische Untersuchungen gut geeignet; sie sind wichtig für Betrachtungen des Wärme- und Wasserhaushalts. Wie bereits im vorigen Kapitel angesprochen, wurden Strahlungsmessungen an geneigten, etwa dem Hang angepaßten Flächen durchgeführt, wobei zunächst die Eignung der eingesetzten Robitzsch-Strahlungsschreiber untersucht wurde. Es ergab sich u.a., daß für den Nordhang die diffuse Strahlung von wesentlicher Bedeutung ist. – Parallel hierzu wurden Messungen der Erdbodentemperaturen von 2 bis 100 cm Tiefe angestellt, die die Bevorzugung des Südhanges insbesondere in den Übergangsmonaten und die Benachteiligung des Nordhangs im Sommer zeigen. Für den Wärmehaushalt ist natürlich von Wichtigkeit die unterschiedliche Schneebedeckung im Winter sowie die durch höheren Niederschlag und geringere Verdunstung an der Nordseite bedingte höhere Bodenfeuchte, d. h. die Wärmeleitfähigkeit ist dort höher. Dies alles hat Auswirkungen auf die Vegetation, was durch phänologische Beobachtungen belegt wurde (GRUNOW 1951).

Der Niederschlag wurde mit hangparallelen Auffangflächen sowie in den Boden versenkten hangparallelen Regenmessern bestimmt. Bei den hangparallelen Auffangflächen entspricht die Horizontalprojektion der Einheitsfläche (200 qcm). Dies ist sinnvoll, da bei jeder kartographischen Niederschlagsdarstellung im geneigten Gelände die entsprechende Horizontalprojektion als Bezugsfläche gilt. Ein Ergebnis war, daß am Nordhang (Luvhang) mit der hangparallelen Fläche 115%, am Südhang (Leehang) nur 94 % der mit üblichen Geräten gemessenen Menge erhalten wurde. Der Luvhang hat – wie zu erwarten – mehr Niederschlag als der Leehang, während bei normalen Geräten der Leehang mehr Niederschlag zeigt. Hier zeigt sich, wie diffizil die Regenmessung ist und wie stark sie von der Aufstellung des Meßgeräts – und unter anderem auch vom Wind – abhängig ist. – Vergleichende Messungen wurden auch am Nebelhorn, im Ammergebirge und am Patscherkofel durchgeführt. – In Bild 3 ist ein kleiner Teil des Meßfeldes (im Jahre 1957) mit verschiedenen Niederschlagsmessern wiedergegeben.

Grundlegende Untersuchungen fanden über den Nebelniederschlag statt, der große Bedeutung für den Wasserhaushalt haben kann (GRUNOW 1952 b, GRUNOW 1955). In bestimmten Gebieten der Erde, z.B. an der Küste Namibias, der der kalte Benguelastrom vorgelagert ist, bildet Nebel nahezu die einzige Niederschlagsquelle. Auch im Gebirge, abhängig von Gelände und Bewuchs, ist er ein wesentlicher Beitrag zum Niederschlag. Die seinerzeitigen Untersuchungen am Hohenpeißenberg haben in jüngster Zeit wieder große Bedeutung erlangt für die am Observatorium Hamburg unternommenen Arbeiten über die Nebelinhaltsstoffe (WINKLER und PAHL 1993).

Es wurde ein Drahtzylinder von 200 qcm Querschnittsprojektion als Nebelfänger auf einen normalen Regenmesser aufgesetzt (Bild 4). Er kann als wohldefinierter Ablagerungskörper angesehen werden, der unabhängig von der Anströmrichtung ist. Wenn kein Nebel herrscht, mißt der Regenmesser mit Nebelfänger bei starkem Wind (Bft => 4) praktisch das Gleiche wie der normale

Regenmesser, bei schwachem Wind etwas weniger (93%). Bei Regen mit Nebel (also Berg in Wolken) wurden in einem Sommer (Mai-September 1951) 147% im Vergleich zum normalen Regenmesser beobachtet. Für den gesamten Zeitraum brachte der Nebelfänger ein Plus von 25%. Erwähnt werden sollte eine 7tägige Nebelperiode, die beim Nebelfänger 32,4 mm Niederschlag brachte, beim Hellmann ohne Aufsatz 0,9 mm. Da im Gebirge Nebel häufig ist und sich dann an Bäumen, aber auch an Gras erhebliche Wassermengen absetzen, ist der erhöhte Eintrag von Schadstoffen nicht nur durch die erhöhte Schadstoffkonzentration im Nebel bedingt, sondern auch durch die erhöhte Niederschlagsrate, die vom Niederschlagsmeßnetz nicht erfaßt wird. – Andererseits wird bei Regen ohne Nebel in den Bäumen Wasser zurückgehalten (Interzeption, auch hierzu wurden am Hohenpeißenberg Untersuchungen angestellt), was sowohl im Flachland als auch im Gebirge eine Rolle spielt, während in Mitteleuropa im Flachland der Nebelniederschlag von untergeordneter Bedeutung ist. – Es wurden Vergleichsmessungen am Nord- (Luv-) und Süd- (Lee-) hang durchgeführt. Auch großräumige Vergleiche fanden statt; so wurden Nebelfänger auf 7 deutschen Bergen (darunter Nebelhorn, wo sich im Sommer 1952 ein Plus von 89% zeigte), an der Nordseeküste (praktisch kein Effekt) und auf dem Tafelberg bei Kapstadt installiert. In dieser Frage ergab sich auch eine Zusammenarbeit mit dem jugoslawischen Wetterdienst.

Der Nebelniederschlag nimmt mit der Höhe zu, da die Nebelhäufigkeit mit der Höhe zunimmt, um in größeren Höhen wieder abzunehmen (sehr hohe Lagen nicht so häufig in Wolken wie tiefere). Natürlich spielt auch die Vertikalverteilung des Flüssigwassergehalts in der Wolke eine Rolle. Verständlich ist auch der starke Jahresgang mit einem Maximum im Winter (GRUNOW 1952 b, GRUNOW und TOLLNER 1969).

Zu den geländeklimatologischen Arbeiten müssen auch Messungen der Verdunstung gerechnet werden.

10.1.3 Sonstiges

Weitere wissenschaftliche Arbeiten am Observatorium waren u.a. dem Wärme- und Wasserhaushalt sowie der Entwicklung und Erprobung von Meßverfahren gewidmet. So wurden ergänzend zum Nebelniederschlag Nebelfrostablagerungen untersucht und Nebeltropfenspektren bestimmt. Gemessen wurde auch der Wassergehalt von Schneedecken (GRUNOW 1952 a). Regelmäßige Aufnahmen von Schneedichteprofilen gaben Aufschluß über den Auf- und Abbau einer Schneedecke. Aus den Bestandsänderungen des Wassergehalts wurden Werte für die einzelnen Zuwachs- und Verlustposten des Wasserhaushalts einer Schneedecke abgeleitet. Als Zuwachs sind der freie Niederschlag, abgesetzter Niederschlag (Nebelfrostablagerung) und Kondensation zu nennen, als Verlust Verdunstung und durch Schmelzen bedingtes Sickerwasser. Triebschnee kann sowohl positiv als auch negativ zur Bilanz beitragen. Zur Bestimmung des Sickerwassers wurde eine Meßanord-

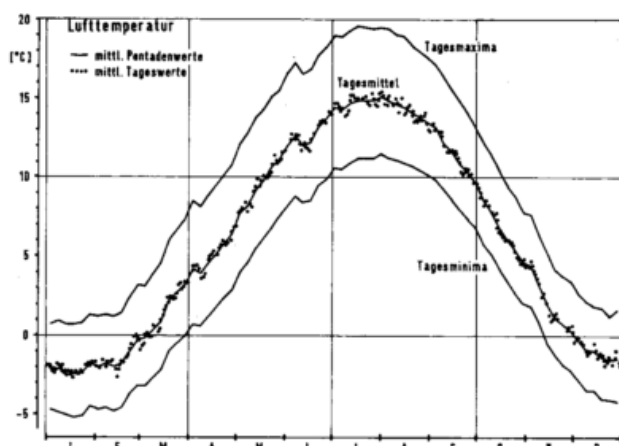


Bild 2: Jahresgang der Lufttemperatur nach mittleren Tages- und Pentadenwerten sowie für mittlere Tagesmaxima und-minima (1879 – 1978) Aus: ANIOL 1981

nung entwickelt. – Im weiteren Verlauf wurde die Abschwächung von Gammastrahlung eines radioaktiven Isotops (Cs^{137}) zur Bestimmung des Wassergehalts benutzt.

Ausgedehnt waren auch die Untersuchungen zur Erfassung und Darstellung von Schneekristallen, aus deren Formen man bei stereomikroskopischer Betrachtung Rückschlüsse auf aerologische Zustände gewinnen konnte. Unter Beachtung der Wachstumsrate und der Fallgeschwindigkeit war die Rekonstruktion von Höhenschnitten der Temperatur und der Feuchte mit hinreichender Genauigkeit möglich (indirekte Aerologie). Dabei war eine Klassifizierung von Reifkristallen (Bild 5) und deren Abhängigkeit vom Temperatur-Feuchte-Milieu vorausgegangen.

Erste Ansätze zur Behandlung von Umweltfragen ergaben sich bereits 1956 bei der Aufstellung eines Sammelgeräts für Regenwasser der Universität Uppsala im Rahmen internationaler Luft- und Regenwasseruntersuchungen, wobei pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit und die Konzentration diverser Inhaltsstoffe bestimmt wurden. Diese Messungen wurden in gleicher Form Ende der achtziger, Anfang der neunziger Jahre in Zusammenarbeit mit dem Landesumweltamt Baden-Württemberg, Karlsruhe, wiederholt.

Von großem Interesse ist die Frage, ob die Verlagerung der Station vom Pfarrhaus (Fensterhütte) zum heutigen Observatorium (Meßfeld) insbesondere auf die Tempe-



Bild 3: Teilansicht des Meßfeldes, im Hintergrund das Observatoriumsgebäude, über dem Turm ein Fesselballon. Aufnahme aus dem Jahre 1957.

raturmessung Einfluß hatte, d.h. ob die Reihe zu diesem Zeitpunkt eine Verwerfung aufweist. Aus diesem Grunde wurden zweijährige Parallelbeobachtungen in der wieder installierten Fensterhütte bewerkstelligt (HOMMEL 1952). Die einzelnen Monatsmittel der Temperatur ergaben keine wesentlichen Abweichungen, sie lagen zwischen 0,0 und 0,4, im zweijährigen Mittel zwischen 0,0 und 0,3°, so daß sich Reduktionswerte angeben ließen. Im Jahresdurchschnitt beider Jahre betrug die Abweichungen -0,05 bzw. -0,09°. Auch die Reihen von Luftdruck, Luftfeuchte und Wind konnten aneinander angeschlossen werden. Beim Niederschlag war dies allerdings wegen des mehrfachen Wechsels von Instrumenten und Aufstellung nicht einwandfrei möglich. – Desweiteren wurde die gesamte Temperaturreihe ausführlich bearbeitet, wobei sich nur um 1810 einige Inhomogenitäten ergaben. Probleme bestanden auch darin, daß von 1879 bis 1900 leider nicht die „Mannheimer Stunden“ benutzt worden waren (GREBE 1957).

Weitere Arbeiten galten der Erprobung und Entwicklung von Instrumenten. Kurz erwähnt werden sollen Versuche zur Verminderung des Windeinflusses bei der Niederschlagsmessung (z.B. Streifenschirm nach Woelfle), Erprobung und Einsatz von Tropfenbildschreibern zur Bestimmung von Tropfenspektren, Entwicklung eines Geräts zur Messung der Niederschlagsintensität mit Hilfe der Abtropfmethode, die eine zeitliche Auflösung von 1 Minute gestattet (sog. Ombrometer), und die Entwicklung eines Niederschlagsdauergebers.

Gegen Ende des Zeitraums wurden im Rahmen des Jahres der ruhigen Sonne aerologische Messungen mit einer Hypsometersonde, die in großen Höhen eine genauere Luftdruckmessung ermöglicht, aufgenommen, 1. Versuchsaufstiege zur Messung des vertikalen Ozonprofils mit der Regener-Sonde durchgeführt und die später operationell eingesetzte Brewer-Mast-Sonde erprobt.

Es wurde ein neues Forschungsprojekt „Verbesserung der Grundlagen für die Abflußvorhersage durch Verwendung eines spezifischen Wetterradargeräts mit dem Ziel, Niederschlagsverteilung und Intensität rasch zu erfassen“ begonnen. Hierbei sollten neue Verfahren der Niederschlagsmessung eingeführt und erprobt werden. Zu diesem Zweck wurde ein 3-cm-Radar (X-Band) installiert.

1963/64 wurden auf Sardinien Raketenanstiege zur Messung von Temperatur und Wind in Stratosphäre und Mesosphäre ins Werk gesetzt. Begonnen wurden auch Messungen der langwelligen Strahlung vom Flugzeug aus zur Bestimmung der Oberflächentemperatur.

10.2 Zeitraum nach 1967

Im Jahre 1967 übernahmen W. ATTMANNSPACHER, 1986 K. WEGE und 1993 P. WINKLER die Leitung des Observatoriums. Die Ergebnisse der seit 1967 durchgeführten Forschungsarbeiten werden in diesem Heft zum



Bild 4: Nebelfänger am Nordhang

Teil beschrieben, so daß hier auf eine Darstellung dieses Zeitraums verzichtet wird, zumal der Umfang dieses historischen Abrisses vorgegeben war. Hier soll daher nur eine kurze Zusammenfassung angefügt werden:

Gegen Ende der „GRUNOW-Zeit“ waren zwei neue Arbeitsgebiete in Angriff genommen worden, nämlich Radarmeteorologie und Struktur der Atmosphäre, wobei die Messung des Ozongehalts der Atmosphäre und diesbezügliche Forschungsarbeiten infolge der Ozonproblematik sich im Laufe der Jahre immer mehr ausweiteten. All diese Aufgaben beanspruchten so viel Arbeitskapazität, daß die vorherigen Forschungen vielfach aufgegeben werden mußten. Beibehalten wurden die Untersuchungen zur zeitlichen und räumlichen Niederschlagsstruktur. In den ersten Jahren wurden noch Fernmessungen mittels Infrarotradiometer vom Flugzeug aus durchgeführt. Aufgaben hierbei waren: Bestimmung der Wasseroberflächentemperaturen von Binnenseen und der Nord- und Ostsee, der Temperaturen bewachsener Böden, der Wärmebelastung der Saar durch Industrieabwässer sowie die Verfolgung nächtlicher Kaltluftflüsse am Taunus.

Bei der Radarmeteorologie nahm die Planung, Installation und Inbetriebnahme eines Radarverbundsystems in Deutschland einen breiten Raum ein (RIEDL 1990). Nur ganz allmählich konnte das Observatorium nach Installation der ersten Radaranlagen (München, Frank-

furt, Hamburg) von diesen Aufgaben etwas entlastet werden. Parallel dazu erfolgte 1988 der Aufbau eines Dopplerradars beim Meteorologischen Observatorium Hohenpeißenberg.

Beim Ozon fanden sich die ersten Anhaltspunkte für Trends im Jahre 1984 mit einer Zunahme in der Troposphäre und einer Abnahme in der Stratosphäre (ATTMANNSPACHER et al. 1984). Die Signifikanz dieser Trends konnte 1988 erstmals nachgewiesen und die Trends quantifiziert werden (WEGE et al. 1989). – Eine wesentliche Erweiterung der Meßmöglichkeiten ergaben sich durch den Aufbau eines Ozonlidars (Inbetriebnahme 1987), mit dem das Ozonprofil zwischen 15 und 50 km Höhe bestimmt werden kann (WEGE und CLAUDE 1988).

1992 fiel die Entscheidung, daß das Observatorium im Rahmen des internationalen „Global Atmosphere Watch“-Programms (GAW) zu einer Globalstation ausgebaut werden soll. Diese Globalstation wird zusammen mit dem Umweltbundesamt am Hohenpeißenberg und an der Zugspitze aufgebaut.

11 Anmerkungen und Danksagung

Für die Zeitspanne bis zum 2. Weltkrieg wurde im wesentlichen auf die z.T. sehr ausführlichen Darstellungen von SCHWAIGER(1792), GRUNOW (1957), CAPPEL (1980), GOLDNER und BAHNMÜLLER (1980), MOIS (1980) sowie ATTMANNSPACHER und MOIS (1981) zurückgegriffen. Für die Kriegszeit, während der eine Außenstelle der FFO auf dem Hohenpeißenberg beheimatet war, lagen wegen der Geheimhaltung und/oder wegen der Beschlagnahme durch die US-Ar-

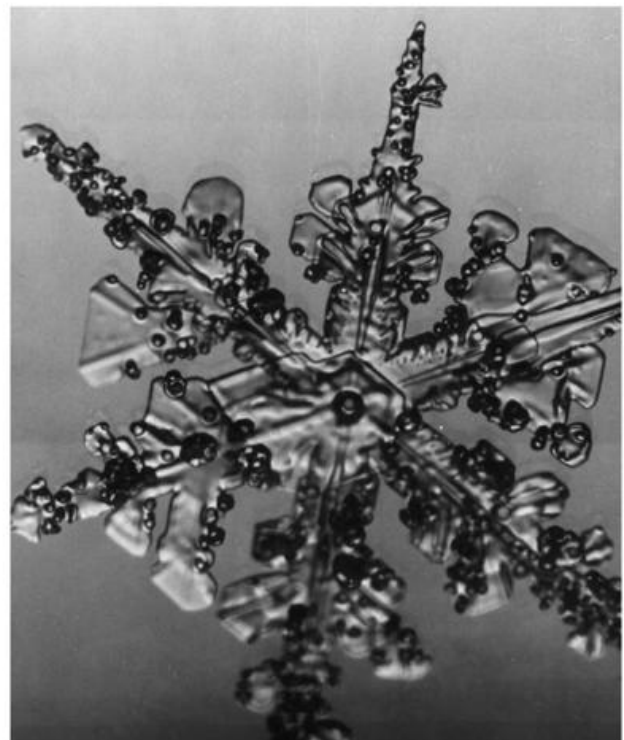


Bild 5: Rauhreifkristall

mee keine Unterlagen mehr vor. Hier war ich auf Auskünfte ehemaliger Mitarbeiter der FFO bzw. auf das „Historische Archiv der Luftfahrt“ in Porz-Wahn angewiesen. – Benutzt wurden auch die Jahresberichte des Wetterdienstes in der US-Zone und des Deutschen Wetterdienstes.

Für ansonsten schwer zugängliche Informationen danke ich vielmals den Herren W. Leiderer (Germerswang), K.-H. Schmid (Gilching), A. Schroth (Oberpfaffenhofen), F. Trenkle (Freising), Herrn H. Leese (Bonn) für Recherchen im o.g. Archiv. Herr J. Schelle (Hohenpeißenberg) berichtete mir vom Kriegsende und aus der „GRUNOW-Zeit“. Auch hierfür herzlichen Dank!

12 Literatur

- ANIOL, R., 1981: Klima. In: 200 Jahre meteorologische Beobachtungen auf dem Hohenpeißenberg 1781 – 1980. Ber. DWD Nr. 155, S. 12 – 57.
- ATTMANNSPACHER, W., MOIS, J., 1981: Zur Geschichte des Observatoriums Hohenpeißenberg. In: 200 Jahre meteorologische Beobachtungen auf dem Hohenpeißenberg 1781 – 1980. Ber. DWD Nr. 155, S. 1 – 12.
- ATTMANNSPACHER, W., HARTMANNSTRUBER, R., LANG, P., 1984: Langzeittendenzen des Ozons der Atmosphäre aufgrund der 1967 begonnenen Ozonmessungen am Meteorologischen Observatorium Hohenpeißenberg. Met. Rsch. 37, S. 193 – 199.
- CAPPEL, A., 1980: Societas Meteorologica Palatina (1780 – 1795). Annalen d. Met. (Neue Folge) Nr. 16, S. 10 – 27.
- DIECKMANN, M., 1941: Die Münchener Institute für Flugfunkforschung. In: Geschichte der Luftfahrtforschung Bd. III, S. 397 – 459.
- GOLDNER, J., BAHNMÜLLER, W., 1980: Bayerische Herzöge, Kurfürsten und Könige. Pannonia Verlag Freilassing.
- GREBE, H., 1957: Temperaturverhältnisse des Observatoriums Hohenpeißenberg. Ber. DWD Nr. 36, S. 10 – 39.
- GRUNOW, J., 1951: Beiträge zum Hangklima. Ber. Wetterdienst in der US-Zone Nr. 35 (Bd. 5), S. 293 – 298.
- GRUNOW, J., 1952 a: Zum Wasserhaushalt einer Schneedecke. Messungen der Schneedichte beim Observatorium Hohenpeißenberg. Ber. Wetterdienst in der US-Zone Nr. 38 (Bd. 6), S. 385 – 393.
- GRUNOW, J., 1952 b: Nebelniederschlag. Ber. Wetterdienst in der US-Zone Nr. 42 (Bd. 7), S. 30 – 34.
- GRUNOW, J., 1955: Der Niederschlag im Bergwald. Forstw. Cbl. 74. Jg., S. 1 – 64.
- GRUNOW, J., 1957: Geschichte des Observatoriums Hohenpeißenberg. Ber. DWD Nr. 36 (Bd. 5), S. 4 – 11.
- GRUNOW, J., 1962: Sonnenschein und Globalstrahlung auf dem Hohenpeißenberg. Ber. DWD Nr. 81 (Bd. 11), S. 1 – 55.
- GRUNOW, J., TOLLNER, H., 1969: Nebelniederschlag im Hochgebirge. Arch. Met. Geoph. Biokl., Ser. B, 17, S. 201 – 288.
- HOMMEL, K., 1952: Der Anschluß der alten Hohenpeißberger Reihe an die Messungen bei der neuen Aufstellung aufgrund zweijähriger Vergleichsablesungen. Ber. Wetterdienst in der US-Zone Nr. 42 (Bd. 7), S. 57 – 62.
- MOIS, J., 1980: Hohenpeißenberg. Informationsschrift des Landkreises Weilheim-Schongau und des Erzbistums München und Freising.
- RIEDL, J., 1990: The Weather Radar Network of the Deutscher Wetterdienst. Progress Report. In: Collier, C. G., Chapuis, M. (Editors): Weather Radar Networking, Seminar on COST Project 73. Kluwer Acad. Publ. Dordrecht, Boston, London, p. 86 – 90.
- SCHWAIGER, A., 1792: Versuch einer meteorologischen Beschreibung des hohen Peißbergs als eine nötige Beylage zu dessen Prospektkarte. Anton Franz sel. Wittwe, München.
- WEGE, K., CLAUDE, H., 1988: Vertical Ozone Profiles Obtained by Differential Absorption Lidar. WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECO 88), Rep. No. 33, p. 187 – 192, Leipzig.
- WEGE, K., CLAUDE, H., HARTMANNSTRUBER, R., 1989: Some Results from 20 Years of Ozone Observations at Hohenpeißenberg. Proceedings of the Quadrennial International Ozone Symposium, Göttingen 1988. A. Deepak Publishing, Hampton, Virginia, p. 109 – 112.
- WEICKMANN, H., 1948: Singularitäten der Temperatur nach den Beobachtungen der Societas Meteorologica Palatina auf dem Hohenpeißenberg. Met. Rsch. 1, S. 517 – 519.
- WINKLER, P., PAHL, S., 1993: Spurenstoffeintrag durch Nebelinterzeption in Schwarzwaldhochlagen. Projektbericht DWD, Met. Obs. Hamburg.
- ZETZMANN, H.J., 1963: Die Drahtlostelegraphische und Luftelektrische Versuchsstation Gräfelfing und das Flugfunk-Forschungsinstitut Oberpfaffenhofen. In: Die Flugfunkforschung im Raume München 1908 – 1962, herausgegeben vom Flugfunk-Forschungsinstitut Oberpfaffenhofen e.V.

2 Auftrag und Organisation des Meteorologischen Observatoriums Hohenpeißenberg

1 Einleitung

Meteorologische Forschung, wie sie von einem Wetterdienst betrieben wird, hat in mehrerer Hinsicht ihre Berechtigung:

- Die speziellen Aufgaben eines Wetterdienstes (z. B. Vorhersage) erfordern Grundlagenforschung und angewandte Forschung.
- Klimaüberwachung, Überwachung der physikalischen Struktur der Atmosphäre, netzmäßige Beobachtung spezieller meteorologischer Parameter usw. bedürfen besonderer Beobachtungsmethoden, die eine wissenschaftliche Arbeitsweise voraussetzen.
- Langzeitbeobachtungen von speziellen physikalischen oder chemischen Parametern zur Feststellung von Tages- oder Jahregängen und von Trends erfordern den Einsatz aufwendiger Meßverfahren, besonderer Kalibriermethoden und ständiger wissenschaftlicher Kontrolle.
- Erprobung von neuen Meßverfahren, Neuentwicklung von Geräten mit dem Ziel eines operationellen Einsatzes benötigen ebenfalls eine wissenschaftliche Arbeitsweise.

Aus diesen Gründen wurde der Wetterdienst zur Wahrnehmung von Forschungsarbeiten gesetzlich verpflichtet.

Trotz dieses Auftrages ist immer wieder hinterfragt worden, ob diese Forschung nicht von Universitäten oder anderen Forschungseinrichtungen übernommen werden könne. Das kann nur teilweise bejaht werden, denn alle Fragen der Langzeitüberwachung und der Beobachtung von Größen, die aufwendige Meßmethoden oder Auswertemethoden, eine längere Kontinuität an einem festen Ort und eine wissenschaftliche Begleitung erfordern, auch um komplizierte Zusammenhänge mit meteorologischen Prozessen zu erkennen, haben frühzeitig zur Einrichtung von meteorologischen Observatorien geführt, an denen hauptsächlich experimentelle Forschung betrieben wird. Die dabei gewonnenen langen Meßreihen sind jedoch immer wieder Gegenstand auch der Universitätsforschung, da aufgrund neuer Erkenntnisse lange Meßreihen sich sehr gut als Prüfstein für Hypothesen nutzen lassen. Das typischste Beispiel hierzu sind die international bedeutenden, über 200 jährigen meteorologischen Beobachtungsreihen des Hohenpeißenbergs.

Die naturwissenschaftliche Forschung geht an ihre Fragestellungen vielfach mit gezielten Laborexperimenten heran. Die Atmosphäre läßt sich im Labor aber nur begrenzt simulieren, so daß nicht alle Phänomene dort untersucht werden können. Daher benutzten Observatori-

en die reale Atmosphäre als Freiluftlabor, zum Teil, um hier konkrete Experimente zu veranstalten, hauptsächlich aber, und das ist ein wesentlicher Aspekt für ihre Bedeutung, um anhand kontinuierlicher Beobachtungsreihen zu warten, bis die Natur das geeignete Experiment vormacht. Die Erfassung der ganzen Bandbreite der Phänomene ist daher eine der typischen Observatoriumsaufgaben.

Kontinuität und Präzision (Homogenität) in der experimentellen anwendungsbezogenen Forschung, empirische und phänomenologische Untersuchungen, wissenschaftliche Begleitung und Bearbeitung der Daten sind die Grundsäulen, auf denen die Observatoriumsarbeit beruht. Nicht zuletzt aufgrund der langjährigen Arbeit und der dabei gewonnenen Erfahrung gehen von Observatorien wichtige Impulse zu neuen Geräteentwicklungen oder gerätetechnischen Verbesserungen aus.

2 Entwicklung der Arbeitsgebiete

Observatorien arbeiten meist an langfristigen Zielen, dennoch wechseln die Forschungsschwerpunkte von Zeit zu Zeit. Die meteorologischen Beobachtungen auf dem Hohenpeißenberg begannen 1781 (ATTMANNSPACHER, 1981; Beitrag WEGE). 1950 wurde die Observatoriumsarbeit auf weitergehende Fragestellungen ausgedehnt, allerdings waren wissenschaftliche Arbeiten anfangs nur in begrenztem Umfang möglich. Die Arbeitsgebiete umfaßten damals

- Klima, Phänologie,
- Strahlungsbilanz, Wärmebildung und Wasserbilanz,
- Niederschlagsphysik und Aerologie,
- Studium der Eiskristalle.

Da nur ein Wissenschaftler vorhanden war, konnte anfangs nur ein kleiner Teil der Vorhaben bearbeitet werden.

1954 kam ein zweiter Wissenschaftler hinzu. Als Arbeitsgebiete nannte man Geländemeteorologie und Niederschlagsphysik. Dazu waren drei Techniker, eine Schreibkraft, Hausmeister und Reinigungskraft vorhanden. Ein Jahr später kam ein weiterer Techniker hinzu. Die erste Gliederung von 1953 sah eine Unterteilung in drei „Sachgebiete“ vor:

- 1953 – 60 **A** Geländemeteorologie (Meßtechnik, Phänologie, Hangwind, Gewitterzüge, Luv-Lee Wirkungen)
- B** Wasserhaushalt und Strömung (Niederschlag, Nebelniederschlag, Nebelfrost, Bodenfeuchte, Wasserhaushalt der Schneedecke)
- [C** Wärme- und Strahlungshaushalt].

Das dritte Sachgebiet wurde zwar bearbeitet aber nicht besetzt, da der Wissenschaftler zu Arbeiten in den USA beurlaubt war. Zusätzlich wurden vom Observatorium

die Aufgaben eines Wetterpostens wahrgenommen. Der Beobachtungsdienst wurde in den 50er Jahren von den Meteorologen mitversehen.

Das Sachgebiet C wurde auch in den Folgejahren nicht besetzt. Erst 1961 gab es Hoffnungen auf die Einrichtung eines dritten Sachgebietes „Luftchemie“. Von ROSSBY (1955) war nämlich ein Meßnetz zur Untersuchung der chemischen Zusammensetzung des Niederschlags eingerichtet worden, und eine der Meßstellen lag auf dem Hohenpeißenberg. Erwähnenswert sind im Zusammenhang mit dem Ende der 70er Jahre aufgekommene Thema „Saurer Regen“ die Arbeiten von HEIGEL (1960) zum pH-Wert und zur chemischen Zusammensetzung des Niederschlags. Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse und auf speziellen Wunsch des damaligen Präsidenten des DWD wurde ein entsprechender Vorschlag ausgearbeitet, der vorsah, den Niederschlag und seine chemischen Verunreinigungen (incl. radioaktiver Beimengungen) sowie die Zusammenhänge mit dem Wetter zu untersuchen, ferner Aerosol (Staub, Kondensations- und Gefrierkerne) und Spurengase (Ozon, CO₂, SO₂, NO₂, NH₃ und CO) zu messen sowie die Trübung, UV, Sicht und Luftelektrizität. Durch ein Gutachten des Bundesrechnungshofs wurde dieser weitsichtige Plan allerdings gestoppt: „Die chemischen Untersuchungen der Luft fallen außerdem gänzlich aus dem Rahmen der sonstigen Arbeiten im DWD; sie können auch von anderen Stellen vorgenommen werden. Aus diesen Erwägungen vermag ich der beantragten Einrichtung eines Laboratoriums für Luftchemie nicht zuzustimmen“. Es hat danach 33 Jahre gedauert, bis 1995 die Zeit reif war, diesen Plan nunmehr zu realisieren. Das erwähnte Gutachten empfahl auch, den Wetterposten künftig als Wetterstation zu bezeichnen. Die Gliederung von 1961 sah folgendermaßen aus:

- 1961 – 67 Sachgebiet 1 Wärme- und Strahlungshaushalt am Boden
2 Wasserhaushalt und Niederschlagsphysik
[Vorschlag 3 Luftchemie (nicht realisiert)]

Die Wetterstation wurde 1964 aus dem Observatorium ausgegliedert und dem Wetteramt München unterstellt, 1977 aber wieder in den Observatoriumsbetrieb integriert, da sich diese Lösung als zweckmäßiger erwies und im übrigen die Fortführung der 200 jährigen meteorologischen Meßreihen Bestandteil der Observatoriumsaufgaben sind.

Im Jahr 1965 wurde statt des Arbeitsgebietes „Luftchemie“ ein drittes Sachgebiet „Aerologische Sondermessungen“ ins Leben gerufen. Den Anstoß hierzu gab das *Internationale Jahr der ruhigen Sonne* (IQSY). Mit Hilfe von Forschungsmitteln der Deutschen Forschungsgemeinschaft sollten Vertikalprofile des Ozons, Feinstruktur der Temperaturprofile und insbesondere die Struktur der Hochatmosphäre untersucht werden, wobei Ozon nur als Tracer für die Untersuchung der Luftbewegung dienen sollte. Bald schon stellte man aber fest, daß die Ozonschicht sehr variabel war und man darüber viel zu wenig wußte.

Die Arbeiten zum Studium der Schneekristalle wurden daher 1967 eingestellt und das Sachgebiet Ozon als lang-

fristige Arbeitsrichtung festgeschrieben. Die bisherigen Arbeiten zum Niederschlag wurden auf „neue Beine“ gestellt, um die neu verfügbare Radartechnik auf ihre Einsetzbarkeit zu erproben. Ab 1968 sahen erste Entwürfe die folgende Gliederung vor:

- 1967 – 73 Sachgebiet 1 Niederschlag, Radarmeteorologie (Methodik, Versuche zur quantitativen Erfassung des Niederschlags mittels Radar, Wassergehalt der Schneedecke)
2 Ozongehalt der Atmosphäre-Strahlungs- und Wärmehaushalt (Ozonprofile, Gesamt-ozon, Ozon als Tracer, Zusammenhänge mit der Großwetterlage und mit Zirkulationsänderungen) (Infrarotmessungen)
[3] Betrieb und Entwicklung (Automation der Registrierung)

Ein Geschäftsverteilungsplan wurde in diesem Sinne erst 1973 genehmigt und weist nun erstmals Dezernate als Organisationseinheiten auf, da die frühere Bezeichnung Sachgebiet unzutreffend war:

- 1973 – 94 Dez. 1: Radarmeteorologie, Probleme der Niederschlagsphysik (quantitativer Flächenniederschlag, Niederschlag und Wasserhaushalt, Struktur des Niederschlags, Tropfenspektren, physikalische Eigenschaften von Schneedecken, spezielle Netze)
Dez. 2: Struktur der Atmosphäre, Ozon (Ozon und Wettergeschehen, Ozon im Rahmen internationaler Meßnetze, bodennahes Ozon)
[Dez. 3: Technische Entwicklung und Betrieb (Geräteentwicklung, Meßwerterfassung, Radarwartung)]

Das dritte Dezernat war nie eigenständig und wurde 1980 in Dezernat 1 eingegliedert. Diese Struktur bestand bis zum Jahr 1994.

Die 1965 mit Forschungsmitteln begonnenen Arbeiten mit der Radartechnik entwickelten sich zur Keimzelle für den Aufbau des Radarverbundes (ANIOL und RIEDL 1978). Die 1967 begonnenen Ozonmeßreihen bilden einen höchst wertvollen Datensatz zur Untersuchung der Veränderung der Ozonschicht.

3 Derzeitige Struktur

Mit der Wiedervereinigung und der Zusammenführung der beiden Wetterdienste ergab sich die Notwendigkeit zur Überplanung der Aufgabenverteilung der beiden westdeutschen (Hamburg und Hohenpeißenberg) und drei ostdeutschen Observatorien (Lindenberg, Potsdam, Wahnsdorf). Hinzu kamen Impulse von der WMO, die unter dem Eindruck einer sich anbahnenden, menschengemachten Klimaänderung durch Beschluß des Exeku-

tiv Komitees 1989 ihre Mitglieder aufforderte, „chemischen Parametern der Atmosphäre künftig die gleiche Beachtung beizumessen wie den klassischen meteorologischen Parametern“. Die WMO rief daraufhin das Programm Global Atmosphere Watch (GAW) ins Leben, das als Bestandteil von GCOS (Global Climate Observing System) die bisherigen Beobachtungsprogramme GO3OS (Global Ozone Observing System) und BAP-MoN (Background Air Pollution Monitoring System) erweitert und in einen größeren Zusammenhang stellte. Die Zusammenlegung der beiden Dienste führte zur Schließung des Meteorologischen Observatoriums Hamburg zum 30.04.1994 und zur Verlagerung von dessen Arbeiten auf dem Gebiet der Strahlung nach Potsdam und der luftchemischen Arbeitsrichtung zum Hohenpeißenberg. In Verbindung mit dem GAW-Programm der WMO führte dies zur Einrichtung einer deutschen GAW-Globalstation (s. Beitrag FRICKE et al.) und damit zu folgender Neugliederung der bisherigen Struktur zum 01.05.1994:

Sachgebiet 1: Methoden und Prozesse der atmosphärischen Chemie

Sachgebiet 2: GAW Globalstation/Regionales Ozonzentrum

Sachgebiet 3: Niederschlagsprozeß und Radarmeteorologie

Über die Arbeiten in den einzelnen Dezernaten geben die nachfolgenden Artikel detailliert Auskunft; die Aufgabenstellung sei hier nur summarisch dargestellt:

Sachgebiet 1:

Luftchemie umfaßt (unter anderem) Photochemie, Umsetzungen an und Bildung von Aerosolpartikeln, Reaktionen von Gasen untereinander oder an Hydrometeor. Es sind Meß- und Kalibrierverfahren zu entwickeln und erproben, Daten im Hinblick auf Modellverifikationen zu interpretieren und besondere Prozesse anhand von Fallstudien zu klären. Vor allem auch die Entwicklung von Methoden zur Trennung natürlicher und anthropogener Anteile an luftchemischen Vorgängen ist eine typische Observatoriumsaufgabe, da zur Interpretation langfristiger Veränderung die Ursachen geklärt werden sollen. (Näheres siehe Beitrag BERRESHEIM.)

Sachgebiet 2:

Das bisherige Ozonprogramm GO3OS der WMO ist als eine Hauptsäule in das GAW-Programm übergegangen. Entsprechend gliedert sich die Arbeit in diesem Dezernat in die GAW-Globalstation und das Regionale Ozonzentrum. Die GAW-Globalstation führt ein umfassendes luftchemisches Langzeitmeßprogramm durch (s. Beitrag FRICKE et al.). Das Regionale Ozonzentrum überwacht die Ozonschicht (s. Beiträge CLAUDE/KÖHLER/STEINBRECHT/VANDERSEE) mit komplementären Meßverfahren zwischen Boden und 50 km Höhe. Außerdem soll das Zentrum WMO-Verpflichtungen in der Region VI (Europa) wahrnehmen, wie Kalibrieren von Dobson Geräten, Training in der Meßtechnik, Beratung bei der Homogenisierung von Ozonmeßreihen usw.

Sachgebiet 3:

Es repräsentiert die Radarforschung im DWD und für den Radarverbund. Hier werden vielfältige Algorithmen zur Präsentation der Radardaten wie Niederschlagsverbreitung, Niederschlagshöhe, Winddaten aus Dopplermessungen entwickelt und ferner auch Algorithmen für Warnprodukte erstellt und erprobt (Gewitter, Hagel). Daneben sind Störungen durch Bodenechos zu beseitigen oder zu minimieren und die quantitative Niederschlagsmessung zu verbessern. Dazu ist der Fortschritt in der Radartechnik zu verfolgen (z. B. Polarisation) und auf seine Verwendbarkeit in einem operativen Betrieb hin zu untersuchen. Schließlich sind Studien zum Niederschlagsprozess durchzuführen, insbesondere zur Unwetterentstehung und -entwicklung. Näheres über die Dezernatsarbeit ist in den Beiträgen von RIEDL/LANG/SELTSMANN zu finden.

Die sich abzeichnende Klimaänderung benötigt lange Meßreihen von hoher Qualität, um sichtbar gemacht zu werden. Die naheliegende Annahme, diese Änderungen mittels modernster Techniken vom Satelliten aus zu erfassen, ist nur eine Teillösung. Zwar können Satelliten ein flächendeckendes Bild liefern, doch benötigen sie nach wie vor ein bodengestütztes Fundament, wie es nur Observatorien bieten. Denn Gerätedriften, vorzeitige Ausfälle, Störungen der Messungen z. B. durch Vulkane und andere Einflüsse haben in der Vergangenheit gezeigt, daß sorgfältig durchgeführte bodengestützte Meßreihen zur Kontrolle unverzichtbar sind. Durch eine geschickte Auswertung soll der Wissenschaftler, der auch mit der eingesetzten Meßtechnik sehr vertraut sein muß, die Meßreihen auf Veränderungen hin untersuchen und aus den per se erheblichen natürlichen Schwankungen den Trend herausfiltern. Am Vorabend der sich abzuzeichnen beginnenden menschlichen Eingriffe in das Klimageschehen sind Observatorien wichtiger denn je, denn sie liefern frühzeitig Hinweise auf Veränderungen in der Umwelt bzw. sie helfen, Naturvorgänge und deren komplexe Wechselwirkungen besser zu verstehen. So müssen z. B. Verfahren entwickelt oder weiterentwickelt werden, um natürliche von anthropogenen Veränderungen in Meßreihen zu trennen. Eine Zunahme z. B. der Windgeschwindigkeit kann zur Verdünnung konstanter anthropogener Emissionen und zu einem abnehmenden Trend von Luftbeimengungen führen. Ohne Berücksichtigung der Meteorologie würde ein Rückgang von Emissionen vorgetäuscht. Oder: ein häufigeres Auftreten von Nord- bzw. Nordwestwinden kann vermehrte Staubewölkung zu bestimmten Jahreszeiten zur Folge haben und die Einstrahlung ändern. Ebenso kann sich die Dunstbildung verstärken und den Strahlungshaushalt verändern. Zusammenhänge dieser Art können oft nur durch geeignete Verknüpfung mehrerer Meßreihen herausgefunden werden. Die genaue Kenntnis der Meßtechnik soll dabei eine Überinterpretation vermeiden helfen.

4 Aktuelle Forschungsaufgaben

Die neue Aufgabe der luftchemischen Überwachung (GAW) stellt eine Reihe von Herausforderungen: große

Themenkomplexe betreffen den Treibhauseffekt, den Abbau der Ozonschicht, die troposphärische Oxidantienbildung beim Photosmog und den „Sauren Regen“. In diesem Zusammenhang gilt es, Beiträge zur Aufklärung von Spurenstoffkreisläufen zu leisten und die unterschiedlichen luftchemischen Prozesse und ihre Abhängigkeit von meteorologischen Parametern und die Beeinflussung durch anthropogene Aktivitäten zu untersuchen. Einige Beispiele mögen dies verständlicher machen:

- 1) Aerosolpartikel wirken dem Treibhauseffekt entgegen (GRASSL, 1995), sie streuen Licht zurück, bevor es in das System eindringen und zu dessen Aufheizung beitragen kann. Partikel entstehen in großem Umfang über dem Ozean als Seesalz bei der Gischtbildung, durch Aufwirbeln von Bodenpartikeln (Winderosion, Sandstürme) und zu einem beträchtlichen Anteil aus reaktiven Spurengasen unter Mitwirkung photochemischer Prozesse. SO_2 , H_2SO_4 , Kohlenwasserstoffe, Ammoniak, Wasserdampf u. a. sind an der Aerosolbildung beteiligt, vielen als der „blaue Dunst“ im Sommer bekannt. Daneben erzeugt der Mensch Partikel durch Industrie, Hausbrand und Verkehr. Ruß ist insbesondere ein Bestandteil, der Strahlung absorbiert. Die Bildungsprozesse aus der Gasphase sind wenig untersucht, es ist aber unmittelbar klar, daß sie in vielfältiger Weise von meteorologischen Bedingungen abhängen. Zum Studium dieser Vorgänge wird ein Gerät zur Messung von H_2SO_4 entwickelt (siehe Beitrag BERRESHEIM), es sind Meßreihen verschiedener Kohlenwasserstoffe aus natürlichen und anthropogenen Quellen aufzuzeichnen, parallel dazu reaktive Gase, physikalische und chemische Parameter des Aerosols (siehe Beitrag FRICKE et al.), Global- und UV-Strahlung, Luftmassenherkunft und meteorologische Parameter wie Temperatur, Luftfeuchte usw. Aus dem breiten Meßprogramm können dann die Bedingungen, unter denen Aerosolbildung stattfindet, herausgefunden werden, ebenso ihre Häufigkeit und Jahreszeitenabhängigkeit. Dazu sollte sich anhand der Strahlungsmeßreihen auch die Einwirkung auf den Strahlungshaushalt direkt nachweisen lassen.
- 2.) Luftchemische Veränderungen wirken auf Wetter und Klima zurück und umgekehrt. Andererseits ergeben sich Änderungen im Spurenstoffgehalt der Luft, wenn sich die Emissionen aus Verkehr oder Industrie oder anderen Quellen ändern. Um aber zu erkennen, ob eine beobachtete Konzentrationsabnahme wirklich auf einem Rückgang anthropogener Emissionen beruht oder z. B. eine Zunahme der Windgeschwindigkeit zurückzuführen ist, die eine stärkere Verdünnung in ein größeres Luftvolumen bewirkt, sind besondere meteorologische Analysen vorzunehmen, um die richtige Interpretation der Meßreihen sicherzustellen. GRAF et al. (1995) haben gezeigt, daß der Druckgradient zwischen Mitteleuropa und dem Islandtief gestiegen ist, was einerseits die Sturmhäufigkeit erhöhen (mehr Seesalz), aber auch zu einem rascheren Abtransport von Emissionen

führen sollte. Um solche Einflüsse in den GAW-Beobachtungsreihen zu erkennen, sind geeignete „meteorologische Filter“ zu entwickeln, die erlauben, natürliche Vorgänge und deren Veränderungen von den anthropogenen Einflüssen zu separieren.

- 3.) Die Algorithmen zur Interpretation der Daten des Wetterradars nutzen die vorhandenen Informationen bisher nur teilweise aus. So kann durch eine Analyse des Radarscans mit einfachen Algorithmen erkannt werden, ob der Niederschlagsprozess auf Aufleitvorgängen oder auf konvektiven Vorgängen beruht. Damit ließe sich die jetzt verwendete mittlere Z/R-Beziehung zur Berechnung der Niederschlagsrate ersetzen durch eine an konvektive oder stratiforme Prozesse besser angepaßte Z/R-Beziehung und die Zuordnung zum Niederschlagsgeschehen ließe sich automatisieren (vgl. hierzu DÖLLING et al. 1996)

Desweiteren sind bisher die Zusammenhänge zwischen dem vertikalen Reflektivitätsprofil und dem am Boden ankommenden Regentropfenspektrum wenig untersucht, bzw. nicht genutzt. Es gilt zunächst herauszufinden, welcher Bereich des Reflektivitätsprofils für die Ausbildung des Tropfenspektrums von Bedeutung ist. Dann kann aus einer Tabelle das jeweils günstigste Regentropfenspektrum bei der Umrechnung der Radarechos in Regenraten ausgewählt werden, wovon eine Verbesserung bei der Bestimmung des quantitativen Niederschlags zu erwarten ist. (s. Beitrag LANG)
- 4) Im Zusammenhang mit dem bisherigen und weiter fortschreitenden Abbau der Ozonschicht könnte die UV-Strahlung langfristig angestiegen sein. Die UV-Strahlung wiederum ist von zentraler Bedeutung für alle luftchemischen Vorgänge, da sie die Photolyse des (troposphärischen) Ozons einleitet, wobei nach mehreren Reaktionsschritten und Einbeziehung von Wasserdampf das Hydroxylradikal OH entsteht, das wiederum nahezu alle luftchemischen Reaktionen einleitet. Daher wird einerseits anhand der langen Ozonreihen untersucht, ob sich die UV-Strahlung geändert hat, andererseits wird ein Gerät zur Messung des OH-Radikals entwickelt (s. Beitrag BERRESHEIM), so daß aus einer Zusammenschau der Schluß gezogen werden kann, ob sich auch die luftchemischen Umsetzungen langfristig verändert haben oder verändern werden.

Diese Beispiele mögen genügen, einige aktuelle Fragen der Forschung aufzuzeigen, die am besten an einem Observatorium zu bearbeiten sind, da hier einerseits die erforderlichen Meßreihen vorhanden sind oder erstellt werden können und außerdem das zugehörige wissenschaftlich-technische Fachwissen vorhanden ist.

Die Forschungsaufgaben eines Observatoriums lassen sich nicht vollständig mit Eigenmitteln oder ausschließlich mit eigenem Personal bearbeiten. Am Hohenpeißenberg werden manche Fragen daher im Rahmen von Forschungsprojekten, die über Drittmittel finan-

ziert werden, bearbeitet. Die Ozonmeßreihen wurden mit Mitteln der Deutschen Forschungsgemeinschaft begonnen, auch das erste Radargerät wurde darüber beschafft. Das LIDAR-Gerät zur Untersuchung des Ozonabbaus in der mittleren und oberen Stratosphäre (s. Beitrag STEINBRECHT), wurde durch BMBF-Mittel finanziert. Die Frage, ob sich die UV-Strahlung langfristig erhöht hat, wird im Rahmen des Bayerischen Klimaforschungsprogramms, über vom Land Bayern bereitgestellte Mittel, untersucht. Weitere derzeit laufende Projekte haben zum Thema:

- Internationaler Feldvergleich der Methoden zur Bestimmung von Spurenmetallen im Niederschlag (UBA, 1995 – 1997)
- Höhenabhängigkeit der Spurenstoffdeposition durch Nebel auf Wäldern (BMBF, 1993 – 1995; PAHL 1996)
- Messung der Ozonkonzentrationsverteilung in der oberen Stratosphäre mittels Lidar (BMBF 1993 – 1996)
- Einsatz und Auswertung von Wetterradardaten für BALTEX (BMBF, 1994 – 1997)

Hier werden also Spezialfragen, die über den Observatoriumsbetrieb hinausgehen, besonders intensiv bearbeitet.

5 Querschnittsaufgaben, Öffentlichkeitsarbeit

Ein Observatorium wäre unvollständig dargestellt, würde man nicht Querschnittsaufgaben erwähnen, ohne die ein reibungsloser Betrieb schwer vorstellbar ist. Die Kosten, die ein Observatorium verursacht, sind nicht ganz unerheblich.

Zu den Querschnittsaufgaben zählen:

- Der Geschäftsbetrieb, der die Bearbeitung des Schriftverkehrs, der Haus- und Liegenschaftsverwaltung, von Beschaffungen und Personalangelegenheiten zur Aufgabe hat, setzt moderne Bürotechniken ein, um die sehr vielfältigen Aufgaben zu bewältigen.
- Der umfangreiche Datenanfall an einem Observatorium bedarf eines leistungsfähigen lokalen Netzwerkes, damit die Meßdatenprüfung, Verarbeitung, wissenschaftliche Interpretation und Archivierung mit möglichst geringem Aufwand erreicht werden. Die jüngste Ausweitung des GAW-Meßbetriebs machte eine erhebliche Konzepterweiterung und einen entsprechenden Netzausbau erforderlich, der auch über gute Außenverbindungen verfügt, die die nationale (Radarverbund, DWD) und internationale Kommunikation (z. B. mit wissenschaftliche Datenzentren) erlauben.
- Im Sachgebiet „Meßtechnik und Datenverarbeitung“ werden mechanische und elektronische Reparaturen des Geräteparks vorgenommen. Eine eigene Werkstatt wird benötigt, um Geräteprototypen zu

fertigen (z. B. Beitrag RIEDL) oder spezielle Geräteeile herzustellen, die nicht käuflich zu erwerben sind. Auch soll diese Gruppe dafür sorgen, daß Geräteausfälle so gering wie möglich bleiben.

- Der rund um die Uhr besetzte Betrieb einer Wetterstation dient nicht nur der Fortführung der über 200 jährigen Wetterbeobachtungen, sondern muß zahlreiche Zusatzaufgaben des Observatoriumsbetriebs wie Justier- und Reinigungsarbeiten an Meßgeräten, Probenwechsel, Gerätekontrolle und Sonderbeobachtungen ausführen, die regelmäßig, also auch an Wochenenden bzw. zu bestimmten Tageszeiten (bestimmten Sonnenständen) anfallen.

Die exponierte Lage des Observatoriums auf dem Hohenpeißenberg und die sehr lange Tradition haben zahlreiche Anfragen nach Führungen und Besichtigungen zur Folge. Obwohl bei weitem nicht allen Gesuchen entsprochen werden kann, gehört es zur Öffentlichkeitsarbeit eines Observatoriums, einen Einblick in seine Tätigkeitsgebiete und Forschungsergebnisse zu ermöglichen. Anfragen hierzu kommen auch von Wissenschaftlern aus allen Teilen der Welt.

Zum Aufgabenkatalog zählt natürlich die Publikation der Forschungsergebnisse in den Fachzeitschriften, aber auch die Beantwortung von fachlichen Anfragen aus anderen Behörden, von Universitätsinstituten und Ministerien. Das langjährige gesammelte Wissens- und Erfahrungspotential der Mitarbeiter kommt somit der Gemeinschaft in vielfältiger Weise wieder zugute.

Literatur

- ANIOL, R., RIEDL, J., 1978: Grenzen und Möglichkeiten des Einsatzes von Wetterradargeräten im Flugwetterdienst. *Pro-met*, 8, 19 – 25.
- ATTMANNSPACHER, W., 1981: 200 Jahre meteorologische Beobachtungen auf dem Hohenpeißenberg 1781 – 1980. Ber. DWD Nr. 155, Offenbach.
- GRAF, H.F., PERLWITZ, J. KIRCHNER, I., SCHULDT, I., 1995: Rezente winterliche Klimaänderungen auf der Nordhemisphäre, Ozonänderungen und zunehmender Treibhaus-effekt. *Ann. Meteorol. N.F.* 31, 25 – 26.
- GRASSL, H., 1995: Der veränderte Energiehaushalt der Erde. *Phys. Bl.* 51, 487 – 492.
- HEIGEL, K., 1960: Die pH-Werte von Niederschlägen, Kondensaten, Nebelfrostablagerungen und der Schneedecke auf dem Hohenpeißenberg. Unterschiede der pH-Werte zwischen Hohenpeißenberg und Peißenberg(Tal). *Geofisika Pura et Appl.* 47, 142 – 154.
- PAHL, S., 1996: Feuchte Deposition auf Nadelwälder in den Hochlagen der Mittelgebirge. Ber. DWD, 198.
- ROSSBY, C.-G., EGNER, H., 1955: On the chemical climate and its variation with the atmospheric circulation pattern. *Tellus*, 7, 118 – 133.

3 Das Ozonmeßprogramm am Hohenpeißenberg

1 Einleitung und Übersicht

Die besondere vertikale Verteilung, die große raumzeitliche Variabilität und die außerordentlich vielfältige Bedeutung des Spurengases Ozon erfordern ein sehr aufwendiges Meßprogramm. Im Gegensatz zu vielen anderen atmosphärischen Spurenstoffen, wo Messungen z. B. an einigen Bodenstationen schon genügen, muß beim Ozon, mit seinem Hauptmaximum in der mittleren Stratosphäre, ein deutlich höherer meßtechnischer Aufwand getrieben werden. Je nach Meßverfahren werden hierbei sowohl „in situ“ Geräte, d.h. mit Probenahme vor Ort, als auch Fernerkundungssysteme (remote sensing) eingesetzt. Typische in situ Geräte sind luftansaugende Analysatoren, die hauptsächlich zur Bestimmung des Ozongehaltes bodennaher Luftschichten verwendet werden. Auch wenn dieses Ozon noch nicht einmal 1 % des gesamtatmosphärischen Ozons ausmacht, gibt es mehrere Gründe diese Messungen an möglichst vielen Orten und über lange Zeiträume hinweg durchzuführen. Ozon ist ein starkes Oxidationsmittel, es greift bei zu hoher Konzentration Zellen an. Ozon gilt als Schlüsselsubstanz in der Luftchemie (s. hierzu auch den Artikel von BERRESHEIM), besonders in der komplexen Chemie der verunreinigten Atmosphäre. Es ist die Leitkomponente im photochemischen Smog. Des weiteren ermöglichen Ozonmessungen rund um die Uhr wichtige Aussagen zu luftchemischen Prozessen, die mit anderen Verfahren, die nicht kontinuierlich arbeiten nur mit hohem Aufwand erzielbar wären. Zusätzlich verdichten sie beispielsweise auch die Sondeninformation. Um regelmäßig jedoch in die eigentliche Ozonschicht in der Stratosphäre vorzustößeln, wo etwa 90 % der Ozonmasse zu finden sind, müssen andere Instrumente eingesetzt werden. Für die Langzeitüberwachung und Erforschung der Ozonschicht sind die seit etwa Mitte der sechziger Jahre eingesetzten, ballongetragenen Ozonradiosonden nach wie vor notwendig. Diese unter nahezu

allen Wetterbedingungen fliegenden, leichten Geräten messen vertikale Profile von Ozon, Luftdruck, Temperatur, Feuchte und Wind vom Startort bis in Höhen von circa 30 km. Will man die Ozonverteilung in noch größeren Höhen möglichst genau und höhenaufgelöst messen, muß ein modernes optoelektronisches Fernerkundungsverfahren, das Laser-Radar (LIDAR, s. hierzu auch Promet 1/2 1987) angewendet werden. Mit ihm werden stratosphärische Ozonprofile bis in 50 km Höhe gemessen. Zwar ist im 40 km Bereich der Ozongehalt wieder verhältnismäßig gering, dennoch sind hier exakte Messungen notwendig, da in diesen Höhen einerseits das Strahlungsgleichgewicht der Stratosphäre empfindlich gestört werden kann, andererseits aber reaktives Chlor aus den FCKW hier sein stärkstes Ozonzerstörungspotential entfaltet. In der noch verhältnismäßig kurzen Meßreihe des Hohenpeißenberger Lidars scheint sich dieser Abbau bereits zu bestätigen (CLAUDE et al. 1994). Außerdem lassen sich aus den Primärdaten der Lidarmessung auch wertvolle Temperatur- und Aerosolprofile ableiten (s. Artikel von STEINBRECHT). Die Gesamt Ozonmessungen schließlich geben Auskunft über die Dicke der Ozonschicht, wobei diese Messungen keine Information darüber geben, wie das Ozon vertikal verteilt ist. Erfäßt wird grundsätzlich alles Ozon, was sich bei der sehr genauen direkten Sonnenmessung zwischen dem Spektrophotometer (Dobson, Brewer) und der Sonne befindet. All diese Messungen haben ein Merkmal: Sie sind lokal begrenzt und haben je nach Höhe auch nur eine begrenzte räumliche Aussagekraft. Will man in die Fläche gehen, sind entweder viele dergestalt ausgerüsteter Observatorien notwendig oder es sind andere Verfahren anzuwenden. Die moderne Fernerkundungstechnik ist mittlerweile soweit entwickelt, daß sogar gut aufgelöste Ozonprofile von Satelliten auf ihren Umlaufbahnen gemessen werden. Die großflächige Gesamt ozonmessung via Satellit ist schon seit 1978 möglich. Gewisse Grenzen für die Sa-

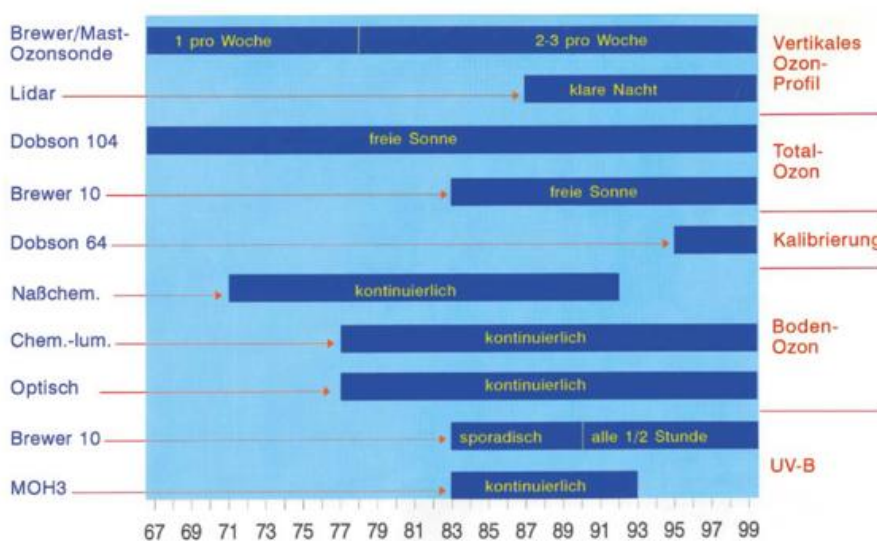


Bild 1: Ozonmeßprogramm des Meteorologischen Observatoriums Hohenpeißenberg mit seiner zeitlichen Entwicklung und den Meßfrequenzen.

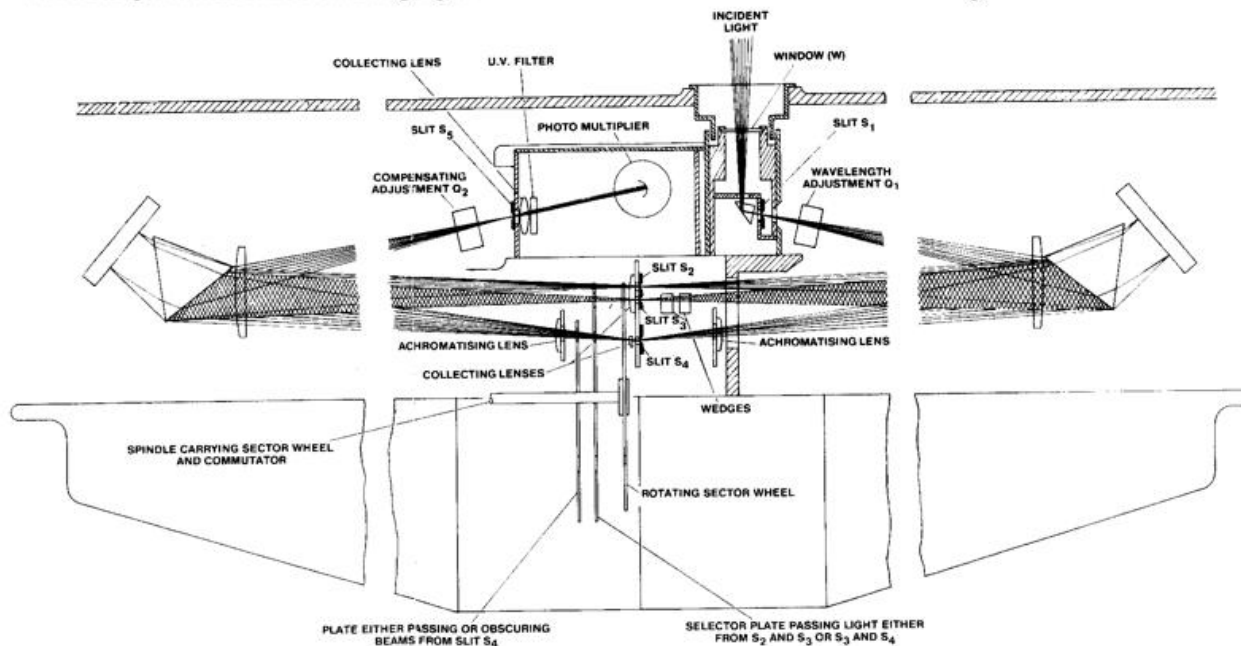
telliteninstrumente gibt es in der ohnehin datenarmen Troposphäre (Wolken, Aerosole), und bei der Lebensdauer und Langzeitstabilität. Besonders kritisch ist dies dann, wenn mit diesen Messungen Trendaussagen getroffen werden müssen. Hierdurch werden an die Qualität und zeitliche Homogenität der Meßergebnisse ganz besondere Anforderungen gestellt, was selbstverständlich für alle Meßverfahren gilt. Deswegen ist eine ständige Qualitätskontrolle und wissenschaftliche Überwachung vor Ort unerlässlich. Internationale Gerätevergleiche und die korrekte und einheitliche Durchführung der Messungen sind ebenso wichtig. Selbst Geräteverbesserungen können nicht sofort erkennbare negative Auswirkungen auf die Datenqualität mit sich bringen, die hinterher mit viel Mühe bereinigt werden müssen (s. Artikel von KÖHLER).

Am Hohenpeißenberg begann der systematische Aufbau eines Ozonmeßprogrammes in den Jahren 1966/67. BREWER und MILFORD (1960) hatten einige Jahre zuvor eine leichte und preisgünstige Ozonsonde entwickelt, die an normale Radiosonden angekoppelt werden konnte. Diese naßchemischen Brewer-Mast Ballon-

sonden registrierten von da an regelmäßig einmal pro Woche die vertikale Ozonverteilung bis in Höhen von etwa 32 km. Durch die von Anfang an strenge Qualitätsüberwachung wurde in Bezug auf Homogenität der Reihe ein weltweit einmaliger Ozon Datensatz geschaffen. Bei dem 90 minütigen Aufstieg werden parallel von der Radiosonde Temperatur, Druck und Feuchte gemessen und zur Bodenstation gefunkt. Ebenfalls 1967 wurden auch die regelmäßigen Gesamt Ozonmessungen mit einem Dobson-Spektrophotometer aufgenommen. Beides bildete den Grundstein der langen und homogenen Ozonreihen des Observatoriums Hohenpeißenberg (ATTMANNSPACHER und HARTMANNSSGRUBER 1980). Die Eigenentwicklung eines naßchemischen Ozonanalysators nach dem Prinzip der Ballonsonde ermöglichte ab 1971 die kontinuierliche Aufzeichnung des bodennahen Ozons direkt an der Station. Im Rahmen eines internationalen Ozonmeßgerätevergleichs auf dem Hohenpeißenberg wurde diese Messung ab 1978 durch ein Chemilumineszenzgerät und durch einen Analysator, der nach dem Prinzip der UV-Absorption arbeitet, ergänzt. Hierdurch wurde eine gegenseitige Kontrolle und damit ein äußerst zuverlässiges Ozonmonitoring erreicht. Im gleichen Jahr wurde auch die Aufstiegsfrequenz der Ballonsonde erheblich gesteigert. Durch zwei Starts im Sommerhalbjahr und drei im Winterhalbjahr konnte die hohe, natürliche Variabilität des Ozons viel besser erfasst werden. Die Aufstellung eines Brewer-Spektrophotometers im Jahre 1983 ermöglichte nicht nur die automatische Registrierung des Gesamt ozons zusätzlich zum Dobson. Mit diesem Gerät konnte ab 1985 auch die UV-Strahlung gemessen werden, was im Zuge einer immer dünner werdenden Ozonschicht mehr und mehr an Bedeutung gewann (s. Beitrag von W. VANDERSEE). Schließlich fanden auch die Vertikalsondierungen noch eine wichtige, räumliche Erweiterung: Durch den Aufbau eines Laser-Radar (LIDAR) -Gerätes wurden ab 1987 sehr genaue Ozonprofilmessungen zwischen 15 und 50km Höhe begonnen, mit denen insbesondere die Ozonüberwachung im kritischen 40 km Be-



Bild 2: Fotografie des Dobson Spektrophotometers (hier ohne Sonneneinstellgerät) mit Schemazeichnung der optischen Komponenten und des Strahlenganges.



reich möglich wurde. Das Observatorium Hohenpeißenberg verfügt damit auch im internationalen Vergleich über ein hervorragendes Instrumentarium zur Ozonüberwachung (Bild 1). Die angewandten Meßverfahren sind voneinander größtenteils unabhängig, was bereits im operationellen Meßbetrieb für eine Kontrolle sorgt und eine hohe Datenqualität gewährleistet. Es ist insbesondere die Qualität und Kontinuität der langen Ozonreihen wodurch das Observatorium Hohenpeißenberg sich international einen guten Namen gemacht hat.

2 Meßverfahren

2.1 Dobson- und Brewer-Spektrophotometer

Das von G. M. B. DOBSON (1931) entwickelte Spektrophotometer (Bild 2) wurde schon in den dreißiger Jahren in einem kleinen Meßnetz zur Gesamtozonbestimmung eingesetzt (z.B. GÖTZ 1931). Es ist heute immer noch Standardgerät im globalen Ozonbeobachtungssystem (früher GO₃OS, heute in das Global Atmosphere Watch aufgenommen) mit derzeit mehr als 100 Stationen.

Durch etwa alle vier Jahre stattfindende Gerätevergleiche und -kalibrierungen ist ein gleichmäßig hoher Kalibrierstatus gewährleistet. Das Meßverfahren basiert auf der sich stark ändernden Ozonabsorption in der Flanke der Huggins-Bande zwischen ca. 300 und 340nm. Führt man hier bei verschiedenen Wellenlängen Intensitätsmessungen des die Atmosphäre durchdringenden Sonnenlichtes durch, kann bei den mittlerweile sehr genau bekannten Absorptionswirkungsquerschnitten des Ozons der Gesamtozongehalt über der Station bestimmt werden. Anstelle von Gesamtozon sind auch die Bezeichnungen Ozonsäulendichte oder Totalozon in Gebrauch; alle haben die Einheit Dobson Unit (D.U.). Ein typischer Wert ist z.B. 300 D.U., was unter Normalbedingungen einer Schichtdicke von 3mm entspricht. Mit dem Dobson Spektrophotometer werden keine absoluten Intensitätsmessungen durchgeführt. Es ist einfacher, die Intensitätsdifferenz des eingefallenen Sonnenlichtes in diskreten Wellenlängenpaaren zu bestimmen, wobei ozonbedingt jeweils die eine Wellenlänge stark, die andere schwach absorbiert wird. Somit ist diese Intensitätsdifferenz das Maß für das Gesamtozon.

Anders beim moderneren Brewer: Dieser vollautomatische, rechnergesteuerte Gitterspektrograph (Bild 3) bestimmt in fünf Wellenlängen der Hugginsbande absolute Intensitäten (photoncounting) und berechnet daraus das Gesamtozon. Die spektrale Auflösung dieses Gerätes beträgt 0,6 nm, beim Dobson liegt sie zwischen 0,9 und 1,5 nm. Automatisiert sind beim Brewer auch die sogenannten Lampentests, die der wellenlängenstabilen Kalibrierung und der Dokumentation derselben dienen. Sowohl die Quecksilber- als auch die Halogen-Standardlampe sind fest im Gerät eingebaut. Die Tests werden regelmäßig vom Menüprogramm aufgerufen und durchgeführt. Beim Dobson ist dies ebenso regelmäßig notwendig, aber nach wie vor in Handarbeit zu erledigen, was auch für die sogenannten Umkehrmessungen zuträfe. Beide Spektralphotometer wären technisch in der Lage diese aufwendigen Messungen zu machen, womit dann grob aufgelöste Ozonprofile abgeleitet werden



Bild 3: Fotografie des Brewer Spektrophotometers montiert auf einem Dreibeinstativ mit Sonnennachführgerät.

könnten. Da die Ozonsonde und das Lidar hierfür jedoch eindeutig die geeigneteren Instrumente sind, werden am Hohenpeißenberg keine Umkehrmessungen durchgeführt. Beim Brewer wären zwar auch diese Messungen vollautomatisch möglich, das Gerät ist aber durch das zusätzlich zu absolvierende, operationelle UV-Meßprogramm bereits völlig ausgelastet.

Die Meßgenauigkeit beider Spektrophotometer ist sehr hoch, der mittlere Fehler eines sorgfältig kalibrierten Gerätes liegt bei etwa 1% bei der direkten Sonnenmessung. Allerdings steigt beim Dobson durch eine höhere Streulichtempfindlichkeit bei tief stehender Sonne der Fehler stärker an als beim Brewer (KÖHLER 1995).

(Hinweis: Auch im folgenden sind nur die Grundzüge der Meßprinzipie dargestellt. Ausführliche Geräte- und Verfahrensbeschreibungen finden sich z. B. in PROMET 4/86 und 1/2/87 (Ozon)).

2.2 Brewer-Mast Sonde

Diese Sonde wird seit 29 Jahren nahezu unverändert am Hohenpeissenberg eingesetzt (Bild 4). Sie besteht aus einer Luftpumpe, einem mit Kaliumjodidlösung gefüllten Sprudler als Reaktionskammer und einer signalverarbeitenden Elektronik, die auch die Ankoppelung an eine konventionelle Radiosonde ermöglicht. In der Reaktionskammer befinden sich eine Platin- und eine Silberelektrode. Gelangt Ozon in die Kammer, verschiebt sich das Jod-Jodid Gleichgewicht und es fließt zwischen beiden Elektroden ein Strom, der unmittelbar der Anzahl

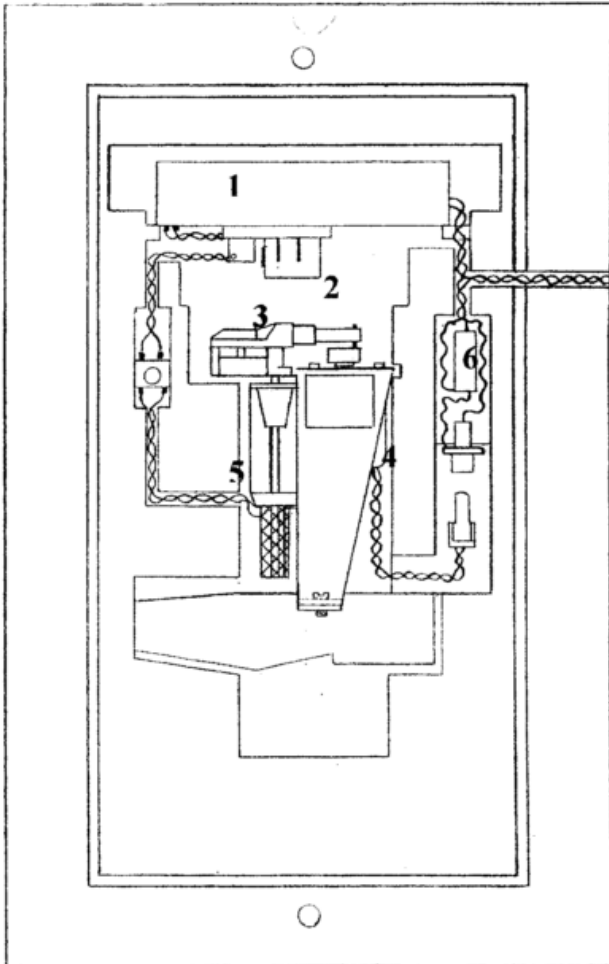


Bild 4: Gehäusenhälfte der Brewer/Mast Sonde. Die Reaktionszelle (Sprudler) mit Luftansaugpumpe und Elektromotor befindet sich unter der „black box“, die die signalverarbeitende Elektronik und Komponenten zur Ankopplung an die VIZ-Radiosonde enthält.

- 1 Vaisala-Interface
- 2 Adapterkarte für Brewer-Mast Ozonsonde
- 3 Pumpe
- 4 Pumpenmotor
- 5 Meßzelle (Bubbler)
- 6 Entstörungs-Kondensator

der eingeleiteten Ozonmoleküle entspricht. Damit handelt es sich um ein streng coulometrisches Verfahren, das keiner Eichung bedarf. Ist der Luftdurchsatz (ca. 200ml/min) und die Lufttemperatur bekannt, kann zu jedem Stromwert der entsprechende Ozonwert errechnet werden (CLAUDE et al. 1987). Jede Sonde wird nach einem seit Jahren erprobten Verfahren gereinigt, technisch geprüft und unmittelbar vor dem Start an einem genau kalibrierten Ozongenerator getestet (nicht geeicht!), wobei die Toleranzgrenzen eng gesetzt sind. Zu stark abweichende Sonden werden nicht gestartet. Dennoch kann aufgrund der leichten und kostensparenden Konstruktion und der schwierigen Einsatzbedingungen (mechanische Beeinträchtigungen, Temperaturen bis unter -80°C , Druck bis 6hPa) nicht immer von einer einwandfreien Funktion bis in 30 km Höhe ausgegangen werden. Durchfliegt die Sonde beispielsweise eine stark verunreinigte Luftschicht (Kondensstreifen), ist die

Messung erheblich gestört, manchmal sogar unbrauchbar. Um solche Aufstiege zu erkennen, bzw. um fehlerhafte Profile zu berichtigen, wird jeder Aufstieg wissenschaftlich geprüft. Die Ozonwerte vom Start bis zum Platzpunkt des Ballons werden aufsummiert, was den sogenannten Integralwert ergibt. Zusammen mit dem abgeschätzten Restozon, oberhalb des Sondierbereiches, ergibt sich ein aus dem Ozonprofil abgeleiteter Gesamtozonwert, der mit einer aktuellen Spektrophotometermessung verglichen wird. Da diese stets genauer ist und sich bei den Sonden leichter Fehler einschleichen können, ist es international üblich, eine entsprechende Korrektur anzubringen. Weichen z.B. der Sondengesamtozonwert und der Spektrophotometer-Gesamtozonwert um 7% voneinander ab, wird jeder einzelne Wert im Ozonprofil um diesen Betrag verändert. Dieser Betrag heißt Korrekturfaktor, ist fester Bestandteil jedes Aufstiegsdatensatzes und ein Qualitätsmerkmal für das Ozonprofil. Alle Ozonsondenstationen des globalen Ozonbeobachtungsnetzes der WMO (GO₃OS) halten sich an diese Richtlinie zur Qualitätssicherung. Im langfristigen, internationalen Vergleich ist Hohenpeißenberg die Station mit den am wenigsten streuenden Korrekturfaktoren. Sie liegen bei etwa 1.08, was eine um durchschnittlich 8 % zu geringe Anzeige seitens der Ozonsonde bedeutet. In erster Linie ist dies auf Ozonzerstörung im Ansaugsystem der Brewer/Mast Sonde und auf eine nicht ausreichende Pumpenleistungskorrektur zurückzuführen (STEINBRECHT et al. 1996).

2.3 Stationäre Analysatoren

Zur kontinuierlichen, stationären Aufzeichnung des Ozons haben sich die Verfahren der UV-Absorption und der Chemilumineszenz durchgesetzt. Beide werden seit 1978 am MOHp zur Messung bodennahen Ozons angewendet. Von 1971 bis 1992 wurden naßchemische Analysatoren, d.h. Geräte die das Verfahren der Ballonsonde nutzen, aber auf Dauerbetrieb ausgelegt sind, eingesetzt (ATTMANNSPACHER 1971).

Das optische UV-Verfahren beruht auf der starken Lichtabsorption durch Ozon in der Hartley Bande. Hier, bei 254nm, emittieren Quecksilberlampen eine starke, wohldefinierte Linie, in der der Absorptionswirkungsquerschnitt von Ozon gut bekannt ist. Wird alternierend ozonhaltige und ozonfreie Luft durch eine Küvette gesaugt, an deren einen Ende eine solche Hg-Lampe und am anderen eine Photodiode zur Messung der Lichtintensität sitzt, kann so die Absorption und über das Lambert-Beersche-Gesetz der Ozongehalt der Luft bestimmt werden. Bei genau bekannter Geometrie der Küvette und anderer Parameter (Temperatur, Druck) ist dies eine Absolutmethode.

Beim Chemilumineszenzverfahren wird kein Licht auf die Luftprobe eingestrahlt, sondern es wird Licht durch eine chemische Reaktion in der Gasphase erzeugt (Chemilumineszenz). Hierzu wird der angesaugte, ozonhaltige Luftstrom in einer Reaktionskammer kontinuierlich mit Äthen in definiertem Verhältnis versetzt, wobei spontan alles Ozon reagieren muß. Die Intensität der Chemilumineszenz wird von dem an der Kammer sitzenden Photodetektor gemessen und ist dem Ozongehalt proportional.

Eine externe Eichung ist notwendig, da wegen Wandreaktionen doch nicht alles Ozon reagiert und nur ein Teil des erzeugten Lichtes als Meßsignal erfaßt wird.

2.4 Lidar

Auch bei diesem Verfahren wird die sehr genau bekannte optische Absorption des Ozons im Ultravioletten genutzt. LIDAR steht für Light Detecting And Ranging, was auf die Verwandtschaft zum Radarverfahren hinweist. Anstelle von LIDAR wird auch oft der Begriff Laser-Radar gebraucht. Für die Messung von Ozonprofilen werden von einem leistungsfähigen Laser Lichtpulse mit einer Wellenlänge von 308nm erzeugt (Bild 5). Bei dieser Wellenlänge ist die Absorption durch Ozon schon so stark, daß ein effektiver Meßeffect erzielt wird, aber nicht so stark, daß zuwenig Licht zum Empfänger zurückkommt. Die Fokussierung in eine mit reinem Wasserstoff gefüllte Ramanzelle erzeugt die Referenzwellenlänge mit 353nm (schwache Ozonabsorption). Mit ihrer Hilfe werden variable Atmosphärenparameter und mehrere Gerätekonstanten bei der Auswertung eliminiert. Beide monochromatische Lichtpulse werden über ein Spiegelsystem 20-50 mal pro Sekunde senkrecht in die Atmosphäre abgestrahlt. Hier kommt es einerseits zur Streuung an den Luftmolekülen (Rayleighstreuung), andererseits zur Absorption, insbesondere durch Ozon bei der 308nm Linie. Ein 60 cm Spiegelteleskop empfängt das zurückgestreute Licht und fokussiert es in das optoelektronische Nachweissystem. Die zeitaufgelöste Registrierung (Radarprinzip) der zurückgestreuten Photonen ergibt die exakte Höhenzuordnung; der relative Vergleich der Rückstreuintensitäten aus zwei benachbarten Höhenschichten die Ozonkonzentration. Durch die simultane und kollineare Abstrahlung der Absorptions- und Referenzlinie sind nicht nur viele Geräte- und Atmosphärenparameter nicht weiter zu berücksichtigen, es wird auch für die bestmögliche Geometrie beim Lichttransfer in der Atmosphäre gesorgt. Vom physikalischen Prinzip her ist das System damit ein Absolutinstrument was keiner Kalibrierung bedarf. Es weist hierdurch die für Langzeitmessun-

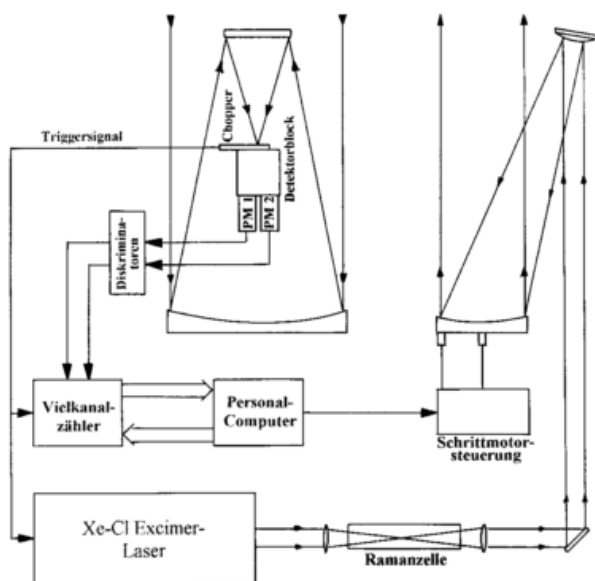


Bild 5: Schemazeichnung der Lidaranlage zur Ozonmessung.

gen erforderliche, hohe Stabilität auf. Das am Meteorologischen Observatorium Hohenpeißenberg seit 1987 unverändert eingesetzte Gerät (CLAUDE et al., 1989) ist ein Nachbau des ursprünglich vom Max Planck Institut für Quantenoptik in Garching entwickelten Gerätes, das 1981/82 erstmals auf der Zugspitze erprobt wurde und heute stark modifiziert an der Koldewey-Station auf Spitzbergen seinen Dienst verrichtet.

Um genaue und ungestörte Messungen zu erhalten, werden diese am Hohenpeißenberg nachts bei möglichst klarem Himmel durchgeführt. Für eine hochreichende, fehlerarme und fein auflösende Messung müssen die Daten von mindestens 5×10^5 Laserschüssen akkumuliert werden, was fast die ganze Nacht dauert. Die aus großer Höhe zurückgestreute Photonenzahl ist sehr gering, das Rückstreusignal nimmt zwischen 15 und 50 km um vier Größenordnungen ab. Obwohl pro Laserschuß etwa 1.5×10^{17} Photonen freigesetzt werden, gelangt aus etwa 50 km Höhe pro 50 Schuß nur noch ein Photon zum Empfänger. Da das Ozon in diesen Höhen ebenfalls stark abnimmt, werden trotz langer Akkumulationszeiten hier die Nachweisgrenzen des Verfahrens erreicht.

Literatur

- ATTMANNSPACHER, W., 1971: Ein einfaches, naßchemisches Gerät mit geringer Trägheit zur Messung des bodennahen Ozons der Atmosphäre, Meteorol. Rdschau., 24, Nr.6.
- ATTMANNSPACHER, W., HARTMANNSTRUBER, R., 1980: Trend and extreme values of 8 years continuous measurements of ozone near the surface at the Meteorological Observatory Hohenpeißenberg, Proc. Quad. Ozone Symp., Boulder.
- BREWER, A.W. und MILFORD, J.R., 1960: The Oxford-Kew Ozone Sonde, Proc. Roy. Soc., 256.
- CLAUDE, H., HARTMANNSTRUBER, R., KÖHLER, U. 1987: Measurement of atmospheric ozone profiles using the Brewer/Mast sonde, WMO/TD-Nr. 179.
- CLAUDE H., GEH, B., Hartmannstruber, R., Hohmann, T., Rothe, K.W., Schönenborn, F., Walther, H., Wege, K., 1989: Weiterentwicklung, Bau und Betrieb eines Lidars zur Bestimmung des atmosphärischen Ozonprofils, Offenbach: Ber. des DWD, 179, 77S.
- CLAUDE, H., F. SCHÖNBORN, W. STEINBRECHT, W. VANDERSEE; 1994: New Evidence for Ozone Depletion in the Upper Stratosphere. Geophysical Research Letters, 21, 2409-2412.
- DOBSON, G.M.B., 1931: A photoelectric spectrophotometer for measuring the amount of atmospheric ozone. Proc. Roy. Soc., 43.
- GÖTZ, F.W.P., 1931: Zum Strahlungsklima des Spitzbergensommers. Strahlungs- und Ozonmessungen in der Königsbucht 1929, Gerlands Beiträge zur Geophysik 31.
- KÖHLER, U., 1995: Homogenization and re-evaluation of the long-term ozone series at the Meteorological Observatory Hohenpeißenberg, Arbeitsergebnisse der Abt. Forschung, DWD, 31, Offenbach.
- STEINBRECHT W., SCHWARZ R. und CLAUDE H., 1996: New Pump Correction for the Brewer/Mast Ozone Sonde: Experimental Determination and Application to Instrument Inter-comparisons, eingereicht bei J. Atmosph. Oceanic Technology

4 Homogenisierung der langen Hohenpeißenberger Ozonreihen

1 Einleitung

Lange meteorologische Meßreihen sind besonders in der Klimatologie von sehr großer Bedeutung. Zur Festlegung des Klimas eines Ortes werden üblicherweise mindestens 30 Jahre der Meßreihen verschiedenster Klimaparameter herangezogen. Noch längere Reihen sind notwendig, um Klimaveränderungen feststellen zu können. Das Meteorologische Observatorium Hohenpeißenberg (MOHp) hat in dieser Hinsicht mit seiner über zweihundertjährigen Klimareihe seit 1781 eine hervorragende Datenbasis. Dies gilt insbesondere für Trendanalysen der Temperaturreihe im Hinblick auf befürchtete Klimaänderungen infolge des Treibhauseffektes.

Die Ozonforschung hat eine ähnlich lange Geschichte aufzuweisen (DÜTSCH 1986). Ozon wurde 1785 von VAN MARUM entdeckt, aber erst im 19. Jahrhundert von SCHÖNBEIN genauer untersucht und als das erkannt, was es ist (SCHÖNBEIN 1845). Aus dieser Zeit stammen auch die ersten Messungen der bodennahen Ozonkonzentrationen z.B. in Wien oder Montsouris bei Paris (LAUSCHER 1983). Der Gesamtzongehalt der Erdatmosphäre konnte erst mit der Entwicklung des Dobson-Spektrophotometers in den 20er Jahren dieses Jahrhunderts bestimmt werden. 1926 wurde die längste, bis heute fortgeführte Gesamtzozonmeßreihe am Lichtklimatischen Observatorium in Arosa (Schweiz) begonnen.

Erste, sporadische Ozonmessungen am Hohenpeißenberg gab es schon in den späten 40er und frühen 50er Jahren. Regelmäßige Ozonbeobachtungen (Gesamtzozon mit dem Dobson Nr. 104 und vertikales Profil mit der Brewer/Mast-Sonde) wurden 1967 begonnen (ATTMANNSPACHER 1987, KÖHLER 1995). Die Ozonmeßreihen am MOHp haben so mit fast 30 Jahren nun eine Zeitdauer erreicht, wie sie bei anderen meteorologischen Parametern für Klimafestlegungen und Trendanalysen mindestens notwendig sind. Damit stellte sich aber auch die Frage nach der Homogenität dieser Meßreihen. Erste diesbezügliche Untersuchungen wurden schon Anfang der 80er Jahre angestellt. Aber erst mit der heutigen Verfügbarkeit von verlässlichen Satellitendaten und der Entwicklung von Prüf- und Homogenisierungsverfahren konnte diese umfangreiche Aufgabe in Angriff genommen werden. Ein wichtiger Teilbereich wurde 1995 mit der Homogenisierung der Dobson-Gesamtzozonmessungen komplett abgeschlossen (KÖHLER 1995), ein großer Teil der Neuauswertung der Ozonsondierungsreihe wurde ebenfalls beendet. Hier besteht aber bei einigen Aspekten in den Meßeigenschaften der Brewer/Mast-Sonden noch Handlungsbedarf. In dieser Arbeit wird nur die Homogenisierung der Gesamtzozonmeßreihe diskutiert.

2 Problematik der Homogenität langer Reihen

2.1 Allgemeines

Es ist bekannt, daß in langen Zeitreihen Inhomogenitäten schleichend oder in Form von Brüchen auftreten können. Trotz dieses Erkenntnis entstehen sie immer wieder, da sie sich im Moment des Entstehens nur selten unmittelbar feststellen lassen. Häufig manifestieren sie sich erst nach einem längeren Zeitraum.

Man versucht natürlich, durch geeignete Qualitätssicherungsmaßnahmen von vornherein das Entstehen von Inhomogenitäten zu verhindern. Im Falle der Gesamtzozonmessungen mit dem Dobson wären dies zum Beispiel:

- Regelmäßige Vergleiche der Instrumente mit einem Weltstandard
- Langley-Plots zur Absolutkalibrierung, die ein gängiges Verfahren zur Eichung von Strahlungsmeßgeräten vor der Sonne darstellen
- Wiederholte Überprüfung der Eichung des sogen. optischen Keils. Die Stellung dieses Keils, abgelesen auf einer Keilscheibe in Grad ist ein Maß für das Intensitätsverhältnis der Meßwellenlängen im UV
- Monatliche Standardlampentests zur Prüfung der spektralen Empfindlichkeit
- Sorgfältiges Protokoll aller Tests, Kalibrierungen und anderer Maßnahmen

Im Falle der MOHp-Gesamtzozonreihe des Dobson Nr. 104 entstand die gravierendste Inhomogenität durch eine fehlgeschlagene Kalibrierung während eines internationalen Dobson-Vergleiches, da die beiden anwesenden Standard-Geräte selbst nicht optimal kalibriert waren. Kleinere Fehler gelangten dadurch in die Reihe, daß die Ergebnisse der allmonatlichen Standardlampentests in den ersten Jahren aufgrund des Fehlens geeigneter Verfahren nicht in entsprechende Korrekturen Eingang fanden.

Erst in der letzten Dekade wurden in einer WMO-Aktion entsprechende Verfahren entwickelt und allen Dobson-Stationen zugänglich gemacht. Ein weitergehender Schritt ist die zusätzliche Bereitstellung von regionalen Standardgeräten neben den schon seit geraumer Zeit vorhandenen Weltstandard-Instrumenten Dobson Nr. 83 und Nr. 65 des Dobson-Zentrallabors in Boulder. Einer dieser Regionalstandards soll der Dobson Nr. 64 werden, der im Rahmen der Verlegung der Regionalen Ozonzentrale für die RAVI (Regional Association) Europa vom Meteorologischen Observatorium Potsdam im Oktober 1995 zum Hohenpeißenberg kam. Mit den redundanten Messungen durch die beiden Dobson Nr.

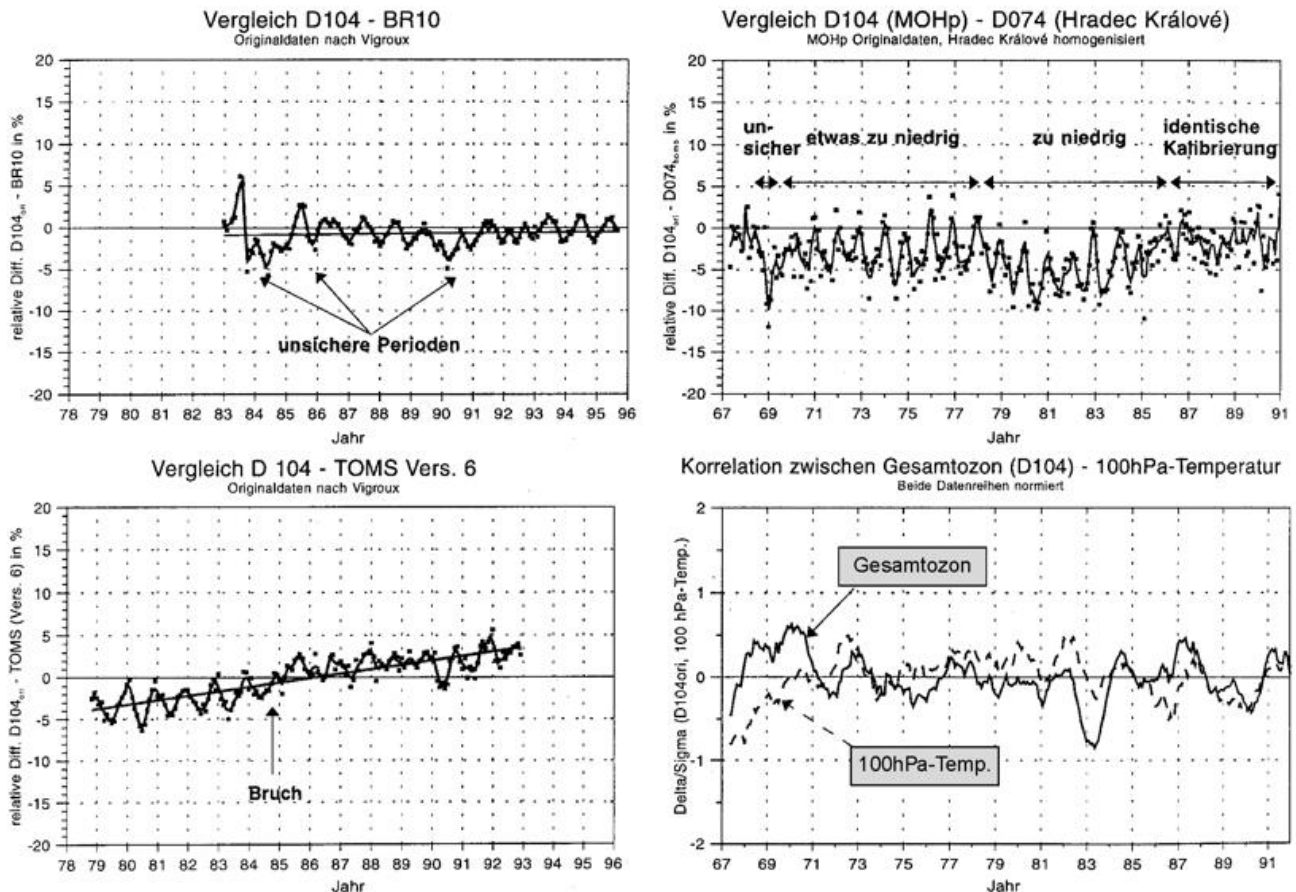


Bild 1: Qualitativer Vergleich Dobson mit Brewer (l.o.), TOMS-Satelliten (l.u.), Dobson aus Hradec Králové (r.o.) und 100 hPa-Temp. München (r.u.)

64 (Standard) und 104 (reguläres Meßgerät) können Fehlkalibrierungen eines Gerätes schneller aufgezeigt werden. Die langwierigen Verfahren zur Entdeckung und Behebung von Inhomogenitäten, wie sie im folgenden beschrieben werden, können so zukünftig vermieden werden.

2.2 Unterschiedliche Eigenschaften von meteorologischen und Ozon-Meßreihen

Das Handwerkszeug (=statistische Verfahren) zur Homogenisierung meteorologischer Parameter wie zum Beispiel Temperatur, Wind oder Niederschlag ist schon seit längerer Zeit verfügbar und im Laufe der Jahre immer weiter verfeinert worden (PAESLER 1970, PAESLER 1983, SCHÖNWIESE 1985). Leider sind diese Methoden zur Prüfung langer Zeitreihen, zur Erkennung und zur Korrektur von Inhomogenitäten nicht so ohne weiteres auf die langen Reihen der verschiedenen Ozonmeßgrößen übertragbar.

Die Messungen des Gesamt ozons oder des Ozonvertikalprofils unterscheiden sich in Methodik sowie zeitlicher und räumlicher Meßdichte deutlich von den Messungen z.B. der Temperatur. Die Lufttemperatur wird mit einem relativ einfachen Instrument in regelmäßigen Zeitabständen bestimmt, während Ozonmessungen üblicherweise mit komplizierten Meßgeräten in unregel-

mäßigen Zeitabständen durchgeführt werden. Bei den Ozonsondierungen werden überdies immer wieder neue Meßgeräte geflogen, nur etwa 60% der gestarteten Sonden werden gefunden und können wiederverwendet werden. Ozonmeßstationen liegen im Gegensatz zu Klimastationen in der Regel einige 100 km auseinander. Da insbesondere beim Gesamt ozon die räumliche Verteilung um einiges großskaliger ist als zum Beispiel bei der Temperatur, ist eine Prüfung der eigenen Reihen mit Hilfe dieser entfernten Stationen trotzdem sinnvoll.

Bei beiden Datensätzen können sprunghafte und/oder schleichende Inhomogenitäten auftreten. Die Ursachen dafür sind jedoch nicht immer identisch. Während Wechsel von Instrumenten oder von Beobachtern/ Gerätebetreuern bei rein meteorologischen Parametern und beim Ozon (Gesamt-, Vertikal-, Boden-) gleichermaßen Sprünge in den Zeitreihen verursachen können, sind Standortwechsel oder -veränderungen nur für die Meteorologie und u.U. für das bodennahe Ozon relevant. Änderungen in Meßfrequenz oder Meßzeit können sich bei beiden Meßgruppen auswirken, sind jedoch in der Meteorologie sehr selten (z.B. Mannheimer Stunden schon seit der Gründung des Meßnetzes der *Societas Meteorologica Palatina* 1781). In der Ozonmessung kann dies jedoch häufiger vorkommen. So wurden die Aufstiegszeiten der Payerner Ozonsonden in der Schweiz mehrfach verschoben, die Wochenend- und Fei-

ertagsmessungen des Gesamt ozons am MOHp mit dem Dobson 104 seit der Einführung der automatischen Brewer-Messungen 1986 eingestellt. Atmosphärische Veränderungen (Trübung), Änderungen in Vorbereitungsprozeduren (Reinigung der Ozonsonden) und Wechsel von Hilfsmitteln (z.B. Testlampen) haben nur Einfluß auf die Genauigkeit der Ozonmeßgeräte, insbesondere für Gesamt ozon und Vertikalprofil.

Ein Erkennen der Auswirkungen dieser vielfältigen Fehlerquellen ist häufig sehr schwierig, insbesondere bei Klimatelementen mit großen lang- und kurzperiodischen, aber auch aperiodischen Schwankungen. Schleichende Inhomogenitäten werden häufig mit Klimaveränderungen in Verbindung gebracht. Während in der Meteorologie die Verfahren zur Erkennung von Inhomogenitäten seit langer Zeit Standard sind, wurden beim Ozon erst in den letzten Jahren Methoden zur Datenprüfung und -korrektur entwickelt und publiziert. Im Gegensatz zu den schon lange bekannten Fehlerquellen bei meteorologischen Meßgeräten wie Thermo-, Hygro- oder Barometern, sind die Meßeigenschaften der komplizierten Ozonmeßgeräte zum Teil erst seit kurzem bekannt oder werden gerade untersucht. Daher muß die Erstellung dieser Meßreihen, deren Prüfung und gegebenenfalls Homogenisierung unbedingt vor Ort wissenschaftlich begleitet werden. Erst die langjährige Erfahrung im Umgang mit den Ozon-Spektrophotometern und -sonden ermöglicht eine fachgerechte Beurteilung und Aufrechterhaltung der für rechtzeitige und sichere Trendanalysen nötigen Datenqualität.

2.3 Methodik der Homogenisierung

2.3.1 Allgemeine Verfahren in der Meteorologie

Bei der Prüfung von langen Zeitreihen auf Inhomogenitäten werden folgende Verfahren eingesetzt:

- Analyse der Eigenschaften des Datensatzes selbst, z.B. als Absolutwertbetrachtung (Monats- oder Jahresmittel) oder Untersuchung der Streuung der Meßdaten. Dieses Verfahren liefert jedoch nur bei Parametern mit normalerweise geringer Schwankungsbreite gute Anhaltspunkte.
- Vergleich mit Datensätzen anderer Parameter der gleichen Station auf Plausibilität. Voraussetzung ist die Existenz einer hohen Korrelation zwischen der zu untersuchenden Größe und einem weiteren homogenen Parameter wie z.B. zwischen Bewölkungsgrad und Sonnenscheindauer, um fehlerhafte Werte sicher erkennen zu können.
- Vergleich mit anderen Stationen (Differenzen- und Quotienten-Verfahren), die ein ähnliches Klima aufweisen.

Sind mit den o.g. Verfahren Inhomogenitäten entdeckt worden, werden häufig diese nahegelegene Stationen mit langen, hoffentlich selbst homogenen Reihen herangezogen, um die inhomogene Meßreihe zu korrigieren. Ausführliche Beschreibungen der einzelnen Methoden sind in PAESLER 1970 bzw. 1983 gegeben.

2.3.2 Spezielle Anwendung beim Ozon

Die unter 2.3.1 aufgelisteten Verfahren zur Entdeckung von Inhomogenitäten können auch beim Ozon Anwendung finden, jedoch sind Modifikationen nötig. Während bei den meteorologischen Parametern meist quantitative Vergleiche wie z.B. Quotienten- oder Differenzenverfahren herangezogen und häufig dann diese Zahlenwerte auch für Korrekturen benutzt werden, sind diese Vergleiche beim Gesamt ozon überwiegend qualitativer Art. Grafiken der entsprechenden Vergleiche liefern optische Hinweise, wo Inhomogenitäten vermutet werden können. Nötige Korrekturen werden nur aus den eigenen Aufzeichnungen, wie z.B. Standardlampentest, abgeleitet. Die Neuberechnung der Gesamt ozon daten beruht also nur auf internen Datenquellen, externe Quellen werden nur zur Prüfung und Validierung herangezogen (WMO 1993, NOAA 1993).

Bei der hier durchgeführten Homogenisierung der Gesamt ozon reihe wurde auf eine Analyse der Eigenschaften der Datenreihe, d.h. der inneren Konsistenz und Plausibilität, verzichtet. Die Prüfung z.B. der Absolutwerte des Gesamt ozons ist aufgrund der großen Variabilität dieser Meßgröße nicht allzu gut geeignet. Eine Unterscheidung zwischen realen Ozonveränderungen und Gerätemeßfehlern ist häufig sehr schwer. Als ein extremes Beispiel dafür können die TOMS-Satellitenmessungen dienen. Diese wurden einem Prüfalgorithmus auf Plausibilität unterzogen, der jedoch so eng gefaßt war, daß die realen Meßwerte des antarktischen Ozonloches als Meßfehler verworfen wurden. Auch der British Antarctic Survey wechselte aus diesen Gründen seinen antarktischen Dobson aus, weil er dessen Messungen nicht traute. Erst als eine japanische Forschergruppe den Mut besaß, ihre erstaunlichen Meßwerte zu veröffentlichen (CHUBACHI 1985) wurden die verworfenen Daten aus den Archiven geholt und für gut befunden.

In Bild 1 sind die vier verschiedenen Verfahren dargestellt, die am Hohenpeißenberg Verwendung fanden:

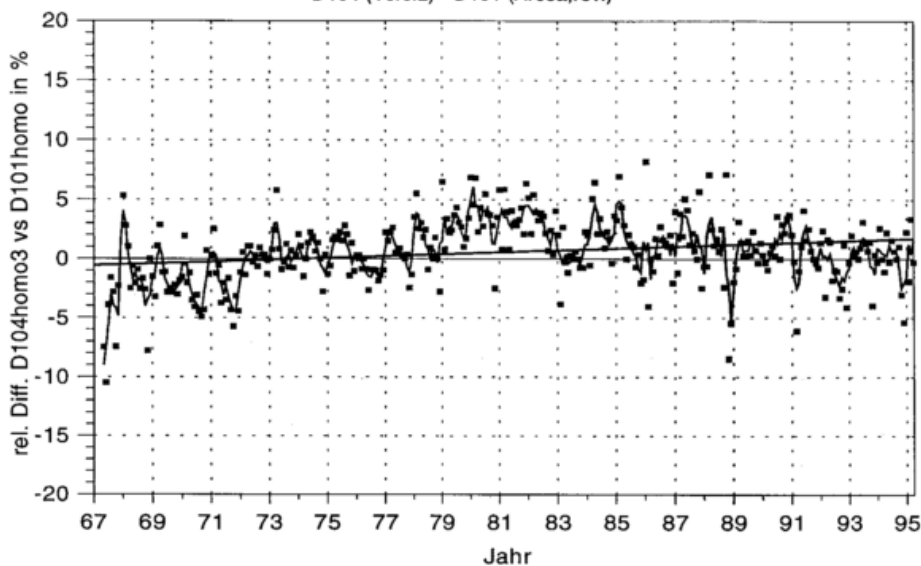
- I Vergleich mit einem anderen, unabhängig geeichten Meßgerät der gleichen Station, dem Brewer Spektrophotometer Nr. 10 (Grafik links oben).
- II Vergleich mit den TOMS-Messungen (links unten) vom Satelliten aus (Vergleiche mit Satellitendaten sind in der konventionellen Meteorologie allgemein nicht üblich).
- III Vergleich mit den bereits homogenisierten Gesamt ozon daten einer anderen Station, hier Hradec Králové in der Tschechischen Republik (VANICEK 1991), die etwa 550 km vom MOHp entfernt liegt (rechts oben).

Bei diesen drei Methoden ist jeweils die relative Differenz der Monatsmittelwerte aus simultanen Messungen dargestellt.

- IV Vergleich der Differenzen zwischen Monatswerten und langjährigen Mittelwerten bei Gesamt ozon und 100 hPa-Temperatur der Münchner Radiosonden-

Met. Obs. Hohenpeissenberg

D104 (Vers.2) - D101 (Arosa,rev.)



Met. Obs. Hohenpeissenberg

D104 (Vers.1) - D101 (Arosa,rev.)

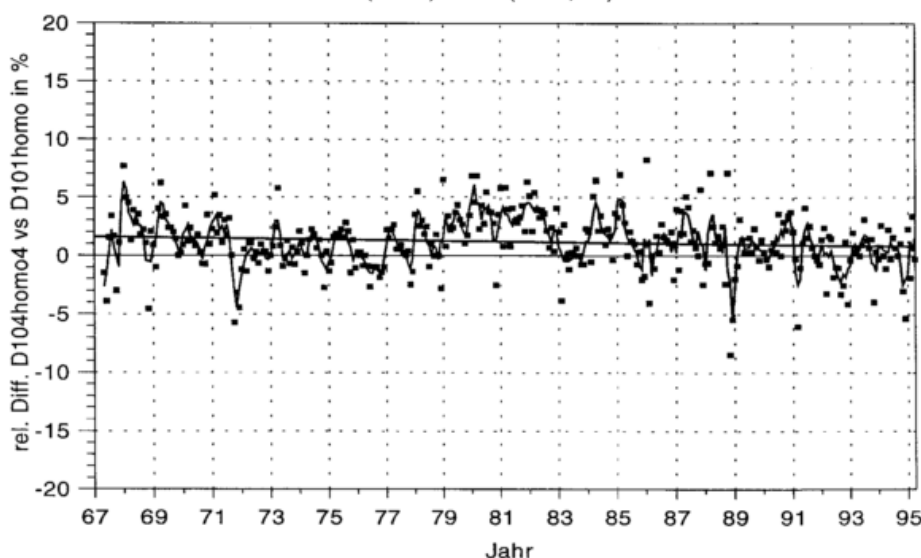


Bild2: Vergleich der beiden D104-Homogenisierungen mit der homogenisierten Arosa-Reihe D101

station (rechts unten). Beide Datensätze wurden mit Hilfe der entsprechenden Standardabweichungen der langjährigen Mittel normiert. Beide Größen sind gut korreliert, so daß Inhomogenitäten erkannt werden können.

In KÖHLER 1995 sind die o.g. Verfahren ausführlicher beschrieben.

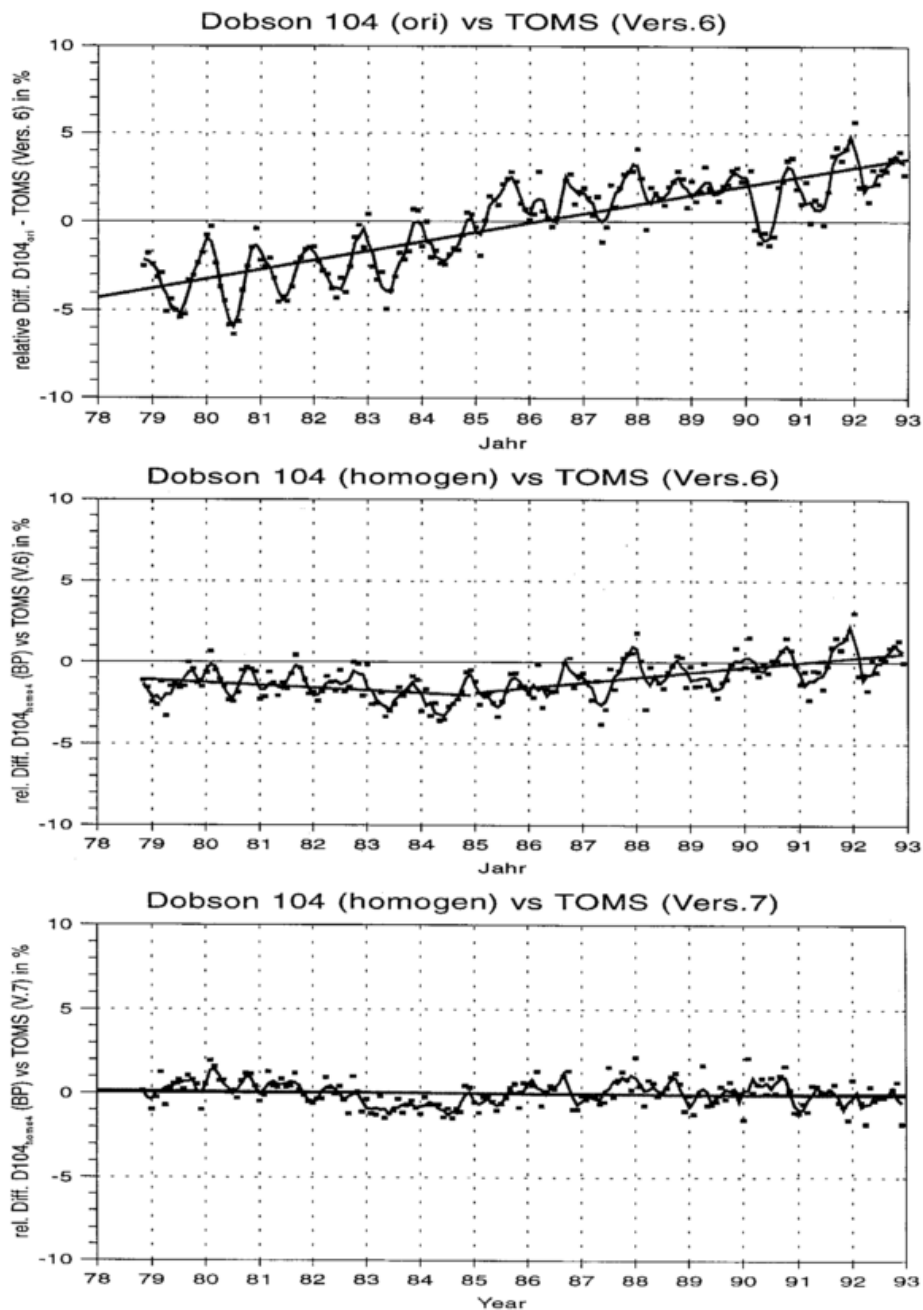
Die unsicheren Perioden in der Dobson 104-Zeitreihe können in allen vier Untergrafiken des Bildes 1 gleichermaßen identifiziert werden. Insbesondere der Zeitraum von 1978 bis 1985 belegt bei allen Vergleichen, daß die Totalozonmessungen mit dem Dobson 104 deutlich zu niedrig gewesen sind. Aber auch davor gibt es Jahre mit etwas zu niedrigen Werten.

Die auf diese Weise mittels externer Datenquellen festgestellten möglichen Inhomogenitäten sollten in den internen Daten wie Standardlampentests ebenfalls zu finden sein. Nachdem man auch dort fündig geworden war,

wurden in Übereinstimmung mit den von der WMO 1993 und der NOAA 1993 empfohlenen Methoden Korrekturen abgeleitet, mit denen die Reihe neu gerechnet wurde. Anschließend wurden wieder die oben beschriebenen Vergleiche durchgeführt, um die Korrekturen zu validieren und zu verifizieren. Bei der Bestimmung der Korrekturen hatten sich für den Zeitraum vor Oktober 1971 zwei verschiedene, erst einmal gleichermaßen plausible Möglichkeiten ergeben, die nur auf unterschiedlichen Referenzkalibrierwerten basierten.

Da die o.g. vier Vergleichsverfahren jedoch kein einheitliches Bild lieferten, war eine eindeutige Entscheidung für eine der beiden Alternativen unmöglich. Mit Hilfe der zu diesem Zeitpunkt verfügbaren, homogenisierten Totalozonreihe der am nächsten gelegenen Station Arosa konnte dann doch eine Korrekturversion als die bessere definiert werden. Das Bild 2 belegt, daß die Version 1 (untere Grafik) gerade in der ersten Dekade ein einheitlicheres Bild liefert als die Version 2 (obere

Bild3: Vergleich der originalen und homogenisierten Dobson 104-Daten mit den TOMS Versionen 6 und 7 (relative Differenzen in %)



Grafik). Daher wurde für die Homogenisierung die Version 1 als bestmögliche Variante ausgewählt. Eine detaillierte Beschreibung zu dieser Entscheidungsfindung ist in KÖHLER 1995 zu finden.

3 Ergebnisse

Der Erfolg der unter 2.3 beschriebenen Verfahren, mögliche Probleme und die Notwendigkeit absolut unabhängiger Korrekturmethode wird im folgenden beschrieben.

3.1 Vergleiche

Der folgende Vergleich der originalen und der neuerechneten D104-Gesamtozondaten mit den TOMS-Satellitenmessungen belegt deutlich die Vorteile einer von externen Datenquellen völlig unabhängigen Korrektur.

Noch während der Arbeiten zur Homogenisierung der D104-Reihe stellte die NASA in der Auswertung ihrer Satellitendaten mögliche Fehler oder Ungenauigkeiten fest. Über verbesserte Auswertelgorithmen wurde schließlich die Version 7 berechnet und als vorläufiger Datensatz dem MOHp zur Validierungszwecken zur Verfügung gestellt (MCPETERS 1995).

In dem Bild 3 sind die Vergleiche der verschiedenen Datenversionen gegenübergestellt. Die obere Grafik zeigt noch einmal den Vergleich der Dobson-Originaldaten mit TOMS Version 6, in der die Inhomogenität der Dobson-Reihe deutlich zu erkennen ist. In der Mitte belegt der Vergleich der neuerechneten Dobson-Reihe Version 1 mit TOMS Version 6, daß zwischen den Zeiträumen 1978-1985 und 1985-1993 weiterhin ein Bruch vorhanden ist. In den internen Datensätzen des Dobson 104

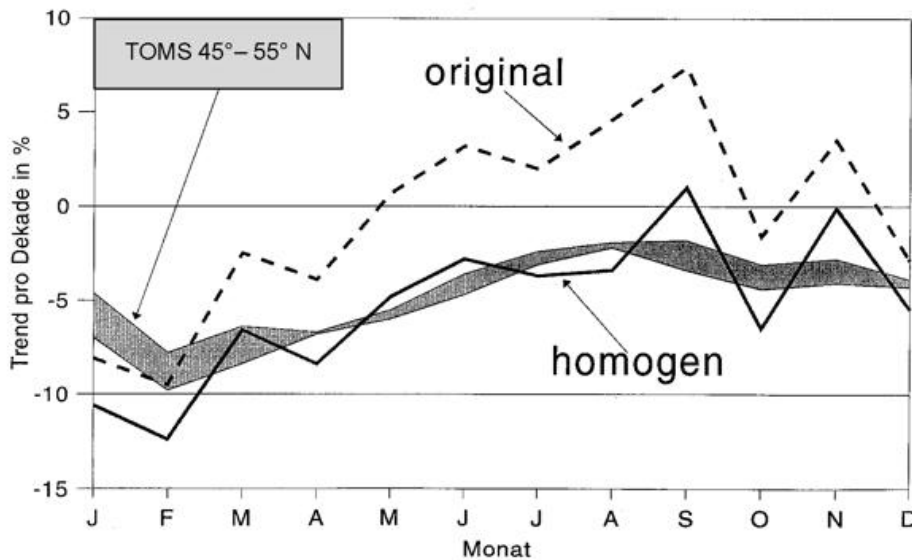


Bild4: Jahresgang des Trends im Gesamt ozon. Originale und homogenisierte Dobson 104-Daten im Vergleich mit TOMS-Satellitentrends (Zeitraum 1/1979 – 12/1990)

konnten keinerlei Hinweise auf eine mögliche Ursache gefunden werden. Auch die Vergleiche mit den anderen Datenquellen ließen keine Unregelmäßigkeiten gerade in diesem Zeitraum erkennen. Daher wurde angenommen, daß die Ursache dieses Bruches eher beim Satelliten zu suchen sei. Entsprechende Diskussionen mit Wissenschaftlern der NASA bestätigten, daß diese eine verbesserte Version 7 erstellen wollten. Der Vergleich mit dieser ist in der unteren Grafik zu sehen und bestätigt, daß das Festhalten an der empfohlenen Korrekturmethode nur mit Hilfe interner Datenquellen gerechtfertigt war. Eine vorzeitige Anpassung der D104-Daten an TOMS Version 6 hätte nach Publizierung der Version 7 fatale Folgen gehabt. Im übrigen kristallisiert sich mehr und mehr heraus, daß von den Satellitenwissenschaftlern die Messungen guter Bodenstationen unbedingt als Ground-Truth für ihre Satellitenmessungen benötigt werden.

3.2 Trendanalysen

Nachdem sich der Erfolg der Homogenisierung auf diese Weise eindeutig herausgestellt hatte, konnte mit gutem Gewissen eine Trendanalyse dieses neuen Datensatzes vorgenommen und mit Trendanalysen der Originaldaten verglichen werden. Bild 4 spiegelt wider, daß z.B. der Jahresgang des Trends im Gesamt ozon nach der Homogenisierung viel besser mit den für unsere Breiten gemittelten Trenddaten des TOMS-Instrumenten übereinstimmt (HERMAN und MCPETERS 1993).

Die Originaldaten wichen insbesondere während des Sommerhalbjahres deutlich von den Trends aus anderen Datenquellen ab. Für den Jahresmittelwert des Gesamt ozons ergibt dies eine Vergrößerung des negativen Trends um ca. 50% von -1.86 auf -2.92% pro Dekade. Das bedeutet, daß mittlerweile seit Beginn der regelmäßigen Ozonmessungen am MOHp 1967/68 etwa 10% des Gesamt ozongehaltes der Atmosphäre verloren gegangen sind.

Der nächste Schritt war die Übertragung der neuen Gesamt ozondaten auf die Reihe der Ozonsondierungen

mit der Brewer/Mast-Sonde, die über den Korrekturfaktor mit den Gesamt ozonmessungen des Dobson 104 verknüpft sind. Gleichzeitig damit wurde auch eine komplette Neuauswertung aller Aufstiege durchgeführt, wobei unglaubliche Meßwerte oberhalb 28 – 30 km oder Aufstiege mit zu schlechten Korrekturfaktoren komplett weggelassen wurden. Die Verbesserung der Datenqualität aufgrund dieser Neuauswertung, insbesondere in den ersten zehn Jahren, führte dazu, daß die Erhöhung des Trends im Gesamt ozon um 50% nicht in den Sondendaten wiederzufinden ist (KÖHLER 1995).

4 Schlußbemerkung

Die Homogenisierung von Ozondaten, hier der Gesamt ozonmessungen, kann sicher in manchen Punkten mit der Homogenisierung von normalen meteorologischen Meßreihen verglichen werden. Es gibt jedoch einige gewichtige Unterschiede: Die Gewinnung von langen Meßreihen der verschiedenen Ozonmeßgrößen ist aufgrund der Komplexität der verwendeten Meßgeräte sehr aufwendig und arbeitsintensiv und erfordert die ständige Betreuung und Begleitung der Messungen durch Wissenschaftler vor Ort. Nur die Kenntnis der örtlichen Besonderheiten und der Historie der Meßdatengewinnung ermöglichte die erfolgreiche Prüfung und Homogenisierung der Dobson-Gesamt ozonreihe.

Überdies sind insbesondere die Satellitenmessungen von der Existenz verlässlicher Ground-Truth-Stationen abhängig. Glaubte man vor einigen Jahren noch daran, daß Satelliten unabhängig von anderen Stationen hochgenaue Meßwerte liefern könnten, hat man zumindest beim Ozon mittlerweile erkannt, daß nur mit Hilfe guter Basis-Stationen die Qualität und Stabilität der Satellitenmessungen geprüft und aufrecht erhalten werden kann. Das Beispiel TOMS Version 6/7 hat dies eindrucksvoll bestätigt. Die völlige Unabhängigkeit bei der Homogenisierung der D104-Reihe war hier Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Validierung und Verifizierung der TOMS-Satellitenmessungen.

Nachdem mit der Übertragung der Gesamt Ozondaten auf die Ozonsondenreihe der erste Schritt zur Homogenisierung der Ozonprofildaten getan wurde, müssen in nächster Zeit die weiteren, nötigen Schritte folgen. Erste wichtige Untersuchungen (Pumpenleistungstest in einem DWD-Projekt, Sondenvergleiche in der Simulationskammer der KFA Jülich im Februar 1996) wurden dahingehend schon durchgeführt und bilden eine fundierte Grundlage für das geplante Vorhaben. Auch hier ist die internationale wissenschaftliche Kooperation Grundlage für den Erfolg.

An diesem Beispiel konnte gezeigt werden, daß erst die vollzogene Homogenisierung der langen Ozonreihe zu gut gesicherten Aussagen über den Schwund der lebenswichtigen Ozonschicht führt. Wichtige Erkenntnisse sind dabei:

- Eine Meßreihe muß einer ständigen Qualitätskontrolle unterzogen werden.
- Erst der Vergleich mit unabhängig gewonnenen Meßreihen (andere Verfahren oder Nachbarstation) bestätigt letztlich die Homogenität und erlaubt dann die gesicherte Trenderklärung.
- Ein System von mindestens drei unabhängig kalibrierten Standardgeräten ist für die Qualitätssicherung der Ozonmessungen im weltweiten Meßnetz besser als nur ein einziges Gerät.

Da derzeit zu befürchten ist, daß die Ozonschicht durch FCKW's noch mindestens für zwei Jahrzehnte weiter abgebaut wird, ist die sorgfältige Überwachung der Ozonschicht von größter Wichtigkeit.

5 Danksagung

An dieser Stelle möchte der Autor besonders herzlich Karel Vanicek (Solar and Ozone Observatory Hradec Králové, Tschechische Republik), Richard McPeters (NASA-GSFC, Ozone Processing Team), Johannes Stähelin (LAPETH, Zürich/LKO Arosa) und Uwe Feister (Meteorologisches Observatorium Potsdam) danken. Nur durch deren unbürokratische Bereitstellung von Vergleichsdaten war eine Prüfung und Validierung der originalen und homogenisierten MOHp-Datenreihe möglich. Dank auch an alle Mitarbeiter in der Ozongruppe des Observatoriums. Ihr Arbeitseifer und Einsatz ermöglichte erst die Erstellung und Bearbeitung dieser langen Ozonreihen.

Im Andenken an Dr. W. Attmannspacher, der von 1967 bis 1986 Observatoriumsleiter war, soll dessen Weitsicht und Kreativität gewürdigt werden. Ohne ihn würde es

diese langen und in ihrer Qualität weltweit anerkannten Hohenpeißenberger Ozonmeßreihen in dieser Form sicher nicht geben.

6 Literatur

- ATTMANNSPACHER, W., 1987: Ozonmessungen am Meteorologischen Observatorium Hohenpeißenberg. In *Promet* Nr. 1/2 '87 „Ozon II und III“, S. 45-48.
- CHUBACHI, S., 1985: A special ozone Observation at Syowa station, Antarctica from February 1982 to January 1983. In *Atmospheric Ozone, Proceedings zum Quadrennial Ozone Symposium in Halkidiki, Griechenland 1984*, D. Reidel Publishing Company, S. 285 – 289.
- DÜTSCH, H.-U., 1986: Die Geschichte der atmosphärischen Ozonforschung. *Promet* Nr. 4 '86 „Ozon I“, S. 3-6.
- KÖHLER, U., 1995: Homogenization and Reevaluation of the Long-Term Ozone Series at the Meteorological Observatory Hohenpeißenberg. Final Report of the DWD-Project K/U 31.
- LAUSCHER, F., 1983: Aus der Frühzeit atmosphärischer Ozonforschung. *Zeitschrift f. Angew. Meteor.* Nr. 35, S. 69 – 80.
- HERMAN, J.R., MCPETERS, R., 1993: Ozone Depletion at Northern and Southern Latitudes Derived From January 1979 to December 1991 Total Ozone Mapping Spectrometer Data. *J. of Geophys. Res.*, Vol. 98, No. D7, S. 12783 – 12793.
- MCPETERS, R., P., 1995: Private Kommunikation, Datentransfer vom NASA-Rechner via FTP.
- NOAA, 1993: Dobson Data Re-Evaluation Handbook. NOAA Technical Report NESDIS 74.
- PAESLER, M., 1970: Die Temperaturmessungen in München 1781-1968. Universität München – Meteorologisches Institut, Wissenschaftliche Mitteilungen Nr. 19.
- PAESLER, M., 1983: Homogenisierung. In *Promet* Nr. 1/2 '83 „Statistische Methoden der Klimatologie“, S. 3-7.
- SCHÖNBEIN, C. F., 1845: Einige Bemerkungen über die Anwesenheit des Ozons in der atmosphärischen Luft und die Rolle, welche es bei langsamen Oxidationen spielen dürfte. *Poggendorfs Ann.* 65, S. 161.
- SCHÖNWIESE, C.-D., 1985: *Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler*. Gebr. Borntraeger, Berlin – Stuttgart.
- VANICEK, K., 1991: Recalculated Total Ozone Data, Hradec Králové, 1962-1990. Publication of the Czech Hydrometeorological Institute, Praha.
- WMO, 1993: Handbook for Dobson Ozone Data Re-Evaluation. GAW, WMO Global Ozone Research and Monitoring Project Report No. 29.

5 Ergebnisse der Ozonforschung am Meteorologischen Observatorium Hohenpeißenberg

1 Einleitung

Ozon ist eines der wichtigsten Spurengase der Erdatmosphäre. Etwa 90 % des Ozons ist in der Stratosphäre angereichert und unterliegt hier dem natürlichen, photochemischen Gleichgewicht und stratosphärischen Transportvorgängen. Obwohl sein Anteil sogar im Ozonmaximum nur etwa einige Millionstel (5-10 ppmv) der übrigen Luftbestandteile ausmacht, ist für die lebensnotwendige Filterung des UV-Lichtes gesorgt. Darüberhinaus prägt das Ozon die Temperaturverteilung in der Stratosphäre. Durch dessen Strahlungsabsorption wird diese etwa 40 km mächtige Schicht derart erwärmt, daß an der Stratopause oftmals wieder Temperaturen um 0°C auftreten.

In der Troposphäre und hier insbesondere in der bodennahen Mischungsschicht ist Ozon bei höheren Konzentrationen schädlich. In dichtbesiedelten, autoverkehrsreichen Regionen und deren Umgebung können bei anhaltendem Strahlungswetter fast stratosphärische Konzentrationswerte erreicht werden. Dies führt zu Belastungen oder Schädigungen der Biosphäre. Besonders die Schleimhautzellen der Atemorgane vieler Lebewesen werden angegriffen oder gar zerstört. Außerdem zählt Ozon zu den Treibhausgasen, trägt also innerhalb der Troposphäre, ebenso wie z. B. Methan oder CO₂, zum anthropogenen Treibhauseffekt bei.

Es gibt mit Abstand keinen anderen Spurenstoff in der Atmosphäre, über den wir so viel wissen wie über Ozon. Schließlich kann die Ozonforschung auf eine mehr als 150-jährige Geschichte zurückblicken, die, wie Bild 1 zeigt, mit der Entdeckung und Benennung dieses Spurengases durch den deutschen Chemiker Schönbein begann. Er entwickelte das erste Nachweisverfahren (Schönbein-Papier), mit dem weit verbreitet und zum Teil mehrere Jahrzehnte lang Messungen des bodennahen Ozons durchgeführt wurden (LAUSCHER 1984). Ohne auf weitere Meilensteine in der historischen Entwicklung der Ozonforschung eingehen zu wollen, zeigt das vor etwa 15 Jahren völlig unerwartet auftretende antarktische Ozonloch, daß dieses Spurengas immer wieder Rätsel aufgibt und es zu Ereignissen kommen kann, die von der Wissenschaft weder vorhergesagt, noch auf Anhieb vollständig verstanden wurden.

2 Anfängliche Untersuchungen

Walter Attmannspacher, Leiter des Observatoriums von 1967-86 hatte ein so großes Interesse am Ozon, daß bereits Ende der 60er Jahre ein operationelles Meßprogramm fest installiert war. Regelmäßig und nach strengen Vorgaben wurden einmal pro Woche Ozonsonden zur Profilmessung bis über 30 km Höhe geflogen und, so oft das Wetter es zuließ, Dobsonmessungen des Gesamt Ozons durchgeführt. Seiner Weitsicht und Zielstrebigkeit ist es zu verdanken, daß zwei der längsten und ho-

mogsten Ozonreihen des globalen Ozonmeßnetzes ins Leben gerufen wurden. Dabei war in dieser Gründerzeit der modernen Luftchemie ausgerechnet das Interesse an Ozon verhältnismäßig gering. Auch Attmannspacher's Interesse war weniger luftchemischer Natur. Vielmehr bezweckte er, die enge Wechselwirkung zwischen Meteorologie und Ozon intensiv zu ergründen, um damit ein Instrumentarium für Langfrist-Wetterprognosen zu schaffen (Ozon als Tracer für die schwierig meßbare Dynamik der Stratosphäre). Damals steckte die numerische Wetterprognose noch in den Kinderschuhen, und die besorgniserregende Ozonproblematik der jüngeren Zeit gab es noch nicht. Schon früh veröffentlichte ATTMANNSPACHER (1969) eine Ozon/Temperaturstatistik für die Stratosphäre. Die Auswertung der ersten Jahre der Ballonsondierung zeigte, daß die Temperatur höher (tiefer) als normal ist, wenn die Ozonkonzentration höher (tiefer) als normal ist und daß die Ozonwelle der Temperaturwelle voraus-

Ozon-Historie

1781	Beginn der Hohenpeißenberger Klimameßreihe
1785	VAN MARUM bemerkt stechenden Geruch bei elektr. Entladungen
1839	SCHÖNBEIN entdeckt und benennt Ozon
1860	1. bodennahe Ozonmessungen mit dem Schönbein-Papier
1880	CORNU und HARTLEY entdecken im Sonnenspektrum starke UV-Absorption durch Ozon
1920-26	Entwicklung des Dobsons und 1. Meßnetz
1930	Chapman beschreibt photochemische Ozon-Bildung
1955	Globales Ozonmeßnetz (Dobsonspektrometer)
um 1960	Entwicklung und Einsatz von Ozon-Radiosonden
1967	Beginn der Ozonmeßreihen am Hohenpeißenberg (Dobson, Sonde)
1979	Regelmäßige Satelliten-Messungen des Ozons
1984/85	Entdeckung des antarktischen Ozonlochs (CHUBACHI, FARMAN)
1985	1. Wiener Konferenz zum Schutz der Ozonschicht
- 1995	Folgekonferenzen in Montreal, London, Kopenhagen und Wien (12/95)
1995	Nobelpreis für Chemie an die Ozonforscher Rowland, Molina und Crutzen

Bild 1: Meilensteine in der Geschichte der Ozonforschung seit 1781.

zueilen scheint. Wie das troposphärische Wettergeschehen und das vertikale Ozonprofil miteinander verknüpft sind, untersuchte HARTMANNGRUBER (1973). Herausgestellt wurde, daß etwa fünf Tage nach Auftreten eines Ozon-Sekundärmaximums in der unteren Stratosphäre eine überzufällige Erwärmung in der Troposphäre zu beobachten ist. Auch der Zusammenhang zwischen Windprofil und Ozonverteilung im Tropopausenbereich wurde mit Hilfe der Sondierungsdaten untersucht (ATTMANNSPACHER und HARTMANNGRUBER 1973). Generell vermitteln die ersten Forschungsergebnisse viele wichtige Grundzusammenhänge zwischen Ozon und meteorologischen Parametern wie die Korrelation zur Tropopausenbewegung, die Höhe der Maximalwindsschicht, die jahreszeitliche Umstellung der stratosphärischen Zirkulation, aber auch extraterrestrische Einflüsse wie die solare Aktivität (Sonnenfleckenzahlen) (ATTMANNSPACHER u. HARTMANNGRUBER 1975). Ohne auf alle Ergebnisse im einzelnen eingehen zu können, soll dies veranschaulichen, daß mit den seinerzeit verhältnismäßig einfachen Mitteln Themen bearbeitet wurden, die heute wieder vermehrt in den Blickpunkt wissenschaftlicher Interesse rücken.

Die regelmäßigen Messungen des Ozons in der freien Atmosphäre mittels Sonde oder Spektrophotometer haben Stichprobencharakter. Kontinuierliche Messungen wurden durch ein am Observatorium entwickeltes nachemisches Gerät ab 1971 möglich (ATTMANNSPACHER 1971) und wurden von da an in Stationshöhe (ca. 1000 m NN) rund um die Uhr durchgeführt. Die photochemische Bildung von Ozonsmog war in Deutschland zu dieser Zeit noch kein Problem, zumindest kein bekanntes. Der an sommerlichen Schönwettertagen beobachtete Tagesgang des Ozons mit einem vormittäglichen Anstieg und nächtlichem Rückgang wurde ausschließlich mit konvektiver Durchmischung erklärt, wobei mit einsetzender Konvektion ozonreichere Luft aus der freien Troposphäre nach unten gemischt wird und nachts in der stagnierenden bodennahen Luft der Ozonabbau an Oberflächen überwiegt. Über den trendartigen Anstieg des bodennahen und des troposphärischen Ozons unter Vermutung anthropogener Einwirkungen, wurde ab Anfang der achtziger Jahre genauso berichtet, wie über die bereits in der Ballonsondierungsreihe deutlich erkennbare stratosphärische Ozonabnahme (ATTMANNSPACHER u. HARTMANNGRUBER 1980, ATTMANNSPACHER et al. 1984).

3 Ozonklimatologie

Ozon ist in allen Bereichen der Atmosphäre eine äußerst variable Komponente, die ähnlich wie z. B. die Temperatur sehr markante Jahres- und größtenteils auch Tagesgänge aufweist. Beim Gesamt Ozon (Bild 2) zeigt der für mittlere Breiten charakteristische Jahresgang das typische Frühjahrsmaximum im April (ca. 380 D.U.) und das Minimum im Oktober/November (ca. 280 D.U.). Die Variabilität ist, wie die Standardabweichung der Monatsmittel zeigt, besonders im Spätwinter/Frühjahr beträchtlich. Dieser Verlauf wird kaum photochemisch erzeugt, sondern vielmehr von der allgemeinen Zirkulation, ins-

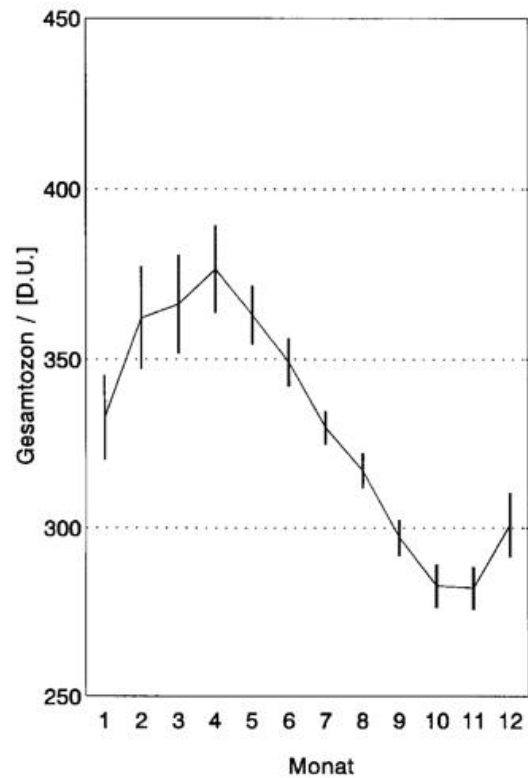


Bild 2: Mittlerer Jahresgang des Gesamt Ozons am Hohenpeißenberg mit Standardabweichung der Monatsmittel.

besondere in Höhe des Ozonmaximums. Die sogenannte Brewer-Dobson-Zirkulation sorgt dafür, daß Ozon aus dem globalen Hauptquellgebiet in der tropischen Stratosphäre polwärts in die jeweilige Winterhemisphäre transportiert wird, wobei es in den höheren Breiten aufgrund stratosphärischer Absinkbewegungen und der hier längeren Lebensdauer zu einer Anreicherung des Ozons kommt. Es sei denn, ein sehr stabiler (antarktischer) Polarwirbel verhindert das Eindringen dieser ozonreichen Luft. Scheinbar paradox, weisen so die hohen Breiten im Spätwinter im allgemeinen die höchsten Gesamt Ozonwerte auf. Verlagern sich solche Luftmassen in der unteren Stratosphäre dann wieder in mittlere Breiten (was im Spätwinter/Frühjahr gehäuft passiert), kommt es oftmals zur zusätzlichen Ausbildung eines sekundären Ozonmaximums in etwa 13 bis 16 km Höhe, so daß in dieser Schicht mitunter die höchsten Ozonwerte des Jahres beobachtet werden.

Komplizierter wird es allerdings, wenn Luftmassen beteiligt sind, die aus dem Polarwirbel selbst stammen und in denen möglicherweise aufgrund sehr niedriger Temperaturen und anthropogenem Chlor chemischer Ozonabbau stattfindet.

Dies kann den gegenteiligen Effekt bewirken. In der unteren Stratosphäre werden dann selbst in den gemäßigten Breiten sehr niedrige Ozonwerte gemessen (CLAUDE et al. 1996, BRÜHL et al. 1996).

Aus Ballonsondierungen und Lidarmessungen zusammengesetzt zeigt Bild 3, daß es in der Atmosphäre bezüglich der Ozonjahresgänge recht unterschiedliche Stockwerke gibt, die grob folgendermaßen charakteri-

DWD, Met. Obs. Hohenpeissenberg Ozon Jahresgang aus Monatsmitteln

Fehlerbalken = Standardabweichung einzelner Monate

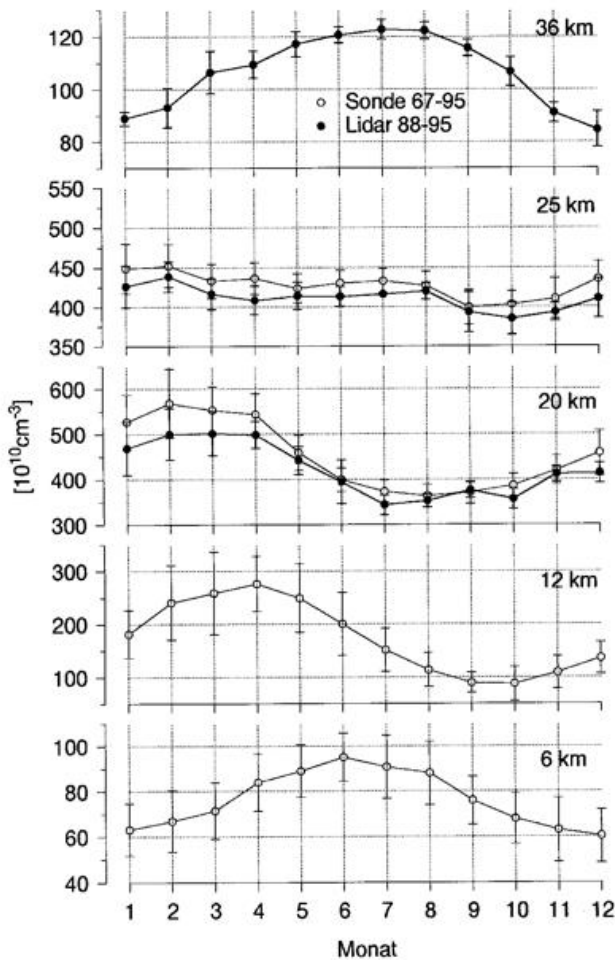


Bild 3: Mittlere Jahresgänge des Ozons in ausgewählten Höhen zusammengesetzt aus Ballonsondierungen und Lidarmessungen am Hohenpeissenberg. Fehlerbalken = Standardabweichung einzelner Monate.

sierbar sind: In der Troposphäre treten die höheren Werte in der warmen und sonnigeren Jahreszeit auf, was einerseits auf intensivierte photochemische Aktivitäten hinweist, andererseits aber auch den im Frühjahr verstärkten Vertikalaustausch widerspiegelt, wodurch immer wieder ozonreiche Luft aus der Stratosphäre eingespült wird. In der Tropopausenregion bei etwa 10 km ist schon eine Phasenverschiebung zu sehen, mit einem Frühjahrsmaximum (April) und einem Herbstminimum bei sehr großer Amplitude. Hier kommt es zu einer Überlagerung verschiedener Prozesse, wobei im hier dargestellten z-System der Jahresgang der Tropopausenhöhe eine große Rolle spielt; d.h. je nach Jahreszeit einmal mehr ozonreiche stratosphärische Luft oder ozonärmere troposphärische Luft dominiert. Im Ozonmaximum selbst (etwa bei 20 km, jahreszeitabhängig) tritt das bereits angesprochene breite Spätwinter/Frühjahrsmaximum auf, wenn die mittleren Breiten am intensivsten mit ozonreicher Luft aus dem polaren Reservoir versorgt werden. Die niedrigsten Werte werden von Juli bis Oktober gemessen. Oberhalb des Ozonmaxi-

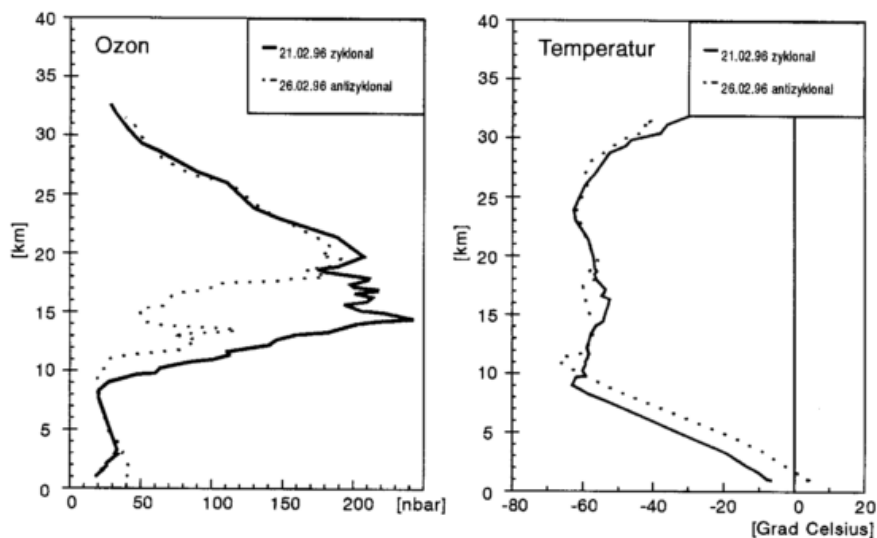
mums, bei etwa 25 km Höhe ist eine indifferente Schicht, die praktisch keinen Jahresgang zeigt und damit die Übergangszone zwischen dynamisch und photochemisch geprägter Region markiert. Die photochemisch aktivste Region läßt sich für die gemäßigten Breiten in der oberen Stratosphäre in 30-40 km Höhe lokalisieren, wo sich, wie in der Troposphäre, ein Sommermaximum ausbildet, das aber gegenüber dem troposphärischen Ozonmaximum mit einer etwa 1-2 monatigen Phasenverschiebung eintritt. Detailliertere Angaben hierzu finden sich beispielsweise bei ATTMANNSPACHER u. HARTMANNGRUBER (1975) und bei VANDERSEE et al. (1993).

In der kurzfristigen Zeitskala (einige Tage) werden sowohl Gesamt ozon als auch das vertikale Ozonprofil sehr stark von der herrschenden (Groß-)Wetterlage bestimmt. Im allgemeinen sind anhaltend antizyklonale Lagen eher mit niedrigen Gesamt ozonwerten verbunden, während unter zyklonalem Einfluß eher hohe Werte registriert werden (z. B. DOBSON 1929). Selbstverständlich zeigt sich dies auch beim Vertikalprofil. WEGE und CLAUDE (1994) zeigten anhand einer Untersuchung der Hohenpeissenberger Reihe, daß ausgeprägte troposphärische Druckgebilde typischerweise mit Ozonprofilveränderungen einhergehen, die sich am stärksten in einem Höhenbereich von knapp unterhalb der Tropopause bis über das Ozonmaximum hinaus bei etwa 22-24 km auswirken. Bild 4 zeigt anhand zweier Ozonsondierungen am Hohenpeissenberg im Februar 1996 den Übergang von einer zyklonalen zu einer antizyklonalen Situation, die auch beim Gesamt ozon innerhalb von 5 Tagen einen Rückgang um 100 D.U. mit sich brachte. Auffallend an diesen Profilen ist beim zyklonalen Fall der sehr kräftige Anstieg oberhalb der Tropopause bis in ein schon tief beginnendes (15 km) breites Ozonmaximum. Die Folge: 432 D.U. Gesamt ozon! Im antizyklonalen Fall 5 Tage später ist bei 15 km ein deutliches Minimum erkennbar, der entsprechende Gesamt ozonwert betrug an diesem Tag nur noch 332 D.U.. „HOCH“ und „TIEF“ geben nur die quasistationären Verhältnisse in der Troposphäre wieder. Die sie umgebende Advektion und Vertikalbewegungen, insbesondere in der unteren Stratosphäre, können dabei sehr unterschiedlich sein und erhebliche Verschiebungen mit sich bringen (siehe z.B. PAETZOLDT et al. 1994). In dem hier gezeigten Beispiel ist außerdem noch eine zusätzliche Beteiligung von Luftmassen, in denen anthropogener Ozonabbau stattgefunden hat, nicht ganz auszuschließen. Hierauf soll an dieser Stelle jedoch nicht eingegangen werden. Auch die Zusammenhänge zwischen Ozon und meteorologischen Parametern sind oftmals so komplex, daß sie bis heute noch nicht vollständig verstanden werden. Dies erschwert die Beurteilung anthropogener Einflüsse und Veränderungen sehr.

4 Die Ozontrends

Es liegen jetzt bei der Gesamt ozonmessung und der Ballonsondierung fast 30-jährige, ununterbrochene Meßreihen vor. Die Gesamt ozonreihe wurde in den letzten Jahren vollständig, die Sondierungsreihe teilweise revidiert und homogenisiert (s. Artikel v. KÖHLER).

Bild 4: Ozon- und Temperaturprofile während einer zyklonalen/antizyklonalen Wetterlage.



Die Bodenozonreihe umfaßt 25 Jahre, die Lidarmessung der Ozonverteilung in der mittleren bis oberen Stratosphäre 8 Jahre. In all diesen Reihen treten signifikante Trends auf.

4.1 Bodennahes und troposphärisches Ozon

Der langjährige Verlauf des Ozons in den unteren Schichten der Atmosphäre ist generell von einer massiven Zunahme geprägt (Bild 5). Sie liegt für die freie Troposphäre und den Zeitraum 1967- 95 bei 17%. Der stärkste Anstieg fiel am Hohenpeissenberg in die ersten 20 Jahre der Sondierung und überschritt zeitweise 2% pro Jahr (CLAUDE et al. 1993, CLAUDE 1994), was im globalen Vergleich zusammen mit einigen japanischen Stationen einen Spitzenwert darstellt. Allerdings ist die weltweite Datenlage beim troposphärischen Ozon recht unbefriedigend, so daß größere Unterschiede nicht verwunderlich sind. Stehen in der Stratosphäre noch andere Datenquellen (Dobson/Brewer- Spektrophotometer, verschiedene Satellitensysteme, Ozonlidars) zumindest seit einigen Jahren zur Verfügung, kann in der freien Troposphäre nur auf Sonden zugegriffen werden. Rund um die Uhr messende Analytoren, insbesondere an Bergstationen, vervollständigen jedoch das Bild. Am Hohenpeissenberg finden die kontinuierlichen Messungen bodennahen Ozons seit 1971 statt. Auch wenn beim Vergleich der beiden Zeitreihen in Bild 5 Unterschiede zur freien Troposphäre erkennbar sind, was auf die völlig verschiedene Probenahme zurückzuführen ist, entsprechen sich die Trendaussagen weitgehend. Auch LOGAN (1995) findet eine weltweite Tendenz zur troposphärischen Ozonzunahme mit dem Schwerpunkt in Mitteleuropa, stellt aber andererseits quantitativ bemerkenswerte Unterschiede für die letzten 20 Jahre fest. In der Hohenpeissenberger Zeitreihe ist eine Trendunterbrechung, beginnend in der zweiten Hälfte der achtziger Jahre erkennbar, die sich besonders in der oberen Troposphäre ausprägte. Das heißt: Seit etwa 1987 nahm das troposphärische Ozon nicht mehr weiter zu, sondern ab. Die Jahre 1994/95 zeigen jedoch wieder ansteigende Werte. Auch die kanadischen Ozonsondenstationen weisen durchweg eine Ozonabnahme auf und zwar schon seit Beginn der achtziger Jahre (TARASICK et al.

1995). Andere süddeutsche Bergstationen (z. B. Zugspitze, Schauinsland, Brotjackriegel) zeigen seit Mitte bis Ende der achtziger Jahre zumindest keinen Anstieg mehr oder gar abnehmende Ozonwerte (z. B. SLADKOVIC et al. 1994). Es ist anzumerken, daß der beobachtete Rückgang oder die Stagnation auf hohem Niveau stattfindet; die Ozonwerte der sechziger/siebziger Jahre liegen noch immer um etwa 15-20% niedriger. Die Ursache dieser Entwicklung ist derzeit noch nicht klar. Zwar sind positive Effekte abgasmindernder Maßnahmen nicht ganz auszuschließen, die gemessenen Stickoxidkonzentrationen und das unvermindert intensive Auftreten von Sommersmogepisoden mit hohen Ozonwerten stehen dazu jedoch im Widerspruch. Auch wenn hierzu noch eingehendere Untersuchungen fehlen, spricht manches dafür, daß nicht die anthropogene, photochemische Ozonproduktion zurückgegangen ist, etwa durch die Einführung des Katalysators oder die Entstickung von Kraftwerksrauchgasen, sondern daß vielmehr seitens der stratosphärischen Intrusionen eine Minderung eingetreten ist. Neben der photochemischen Ozonbildung stellt dieses Einfließen stratosphärischer Luft durch die Tropopausenbrüche in den mittleren Breiten die wichtigste Ozonquelle für die Troposphäre dar. Da jedoch gerade in der untersten Stratosphäre, knapp oberhalb der Tropopause, in den letzten Jahren eine außerordentlich starke Ozonabnahme zu verzeichnen war (um 20% seit 1985-87), kommt aus diesem Reservoir zwangsläufig weniger Ozon in die Troposphäre. Hierfür spricht, daß die hier beobachtete „Trendumkehr“ ein deutliches Vertikalgefälle aufweist: In Tropopausennähe ist sie, wie gesagt, viel ausgeprägter als in der unteren Troposphäre.

4.2 Stratosphärisches Ozon

Alle Ozonmeßreihen dieser Erde zeigen, daß die stratosphärische Ozonschicht in den letzten Jahrzehnten immer dünner wurde, unabhängig davon, ob die für die Trendanalyse verwendeten Daten von ballongetragenen Ozonsonden, Satelliteninstrumenten oder Spektrophotometern stammen. Die langen Hohenpeissenberger Ballonsondierungsreihen identifizieren das stratosphärische Ozonmaximum bei 20 km Höhe als die Regi-

on, die langfristig betrachtet den stärksten Ozonabbau aufweist (CLAUDE et al. 1994a). Auch wenn in jüngerer Zeit ein verstärkter und wahrscheinlich chlorbedingter Ozonabbau in der mittleren bis oberen Stratosphäre nachgewiesen werden konnte (CLAUDE et al. 1994b), steht außer Zweifel, daß der stärkste Ozon-Massenverlust bisher in der unteren Stratosphäre stattgefunden hat, einem Bereich also, der in enger Wechselbeziehung zu vielfältigen meteorologischen Prozessen steht. Manche davon ändern sich periodisch, wie die QBO, ENSO oder der solare Fluß, während andere auch langfristige Änderungen zeigen, wie z.B. die abnehmende Temperatur (s. Abschnitt 6). Zeitlich begrenzt findet auch vulkanbedingter Ozonabbau statt (JÄGER und WEGE 1990, CLAUDE et al. 1994b). Insofern ist die Ursachenbestimmung und besonders die Quantifizierung anthropogener Einflüsse schwierig und derzeit noch nicht gelöst. Der langjährige Verlauf der Ozonjahresmittelwerte in diesen Höhenschichten ist hier anhand der ho-

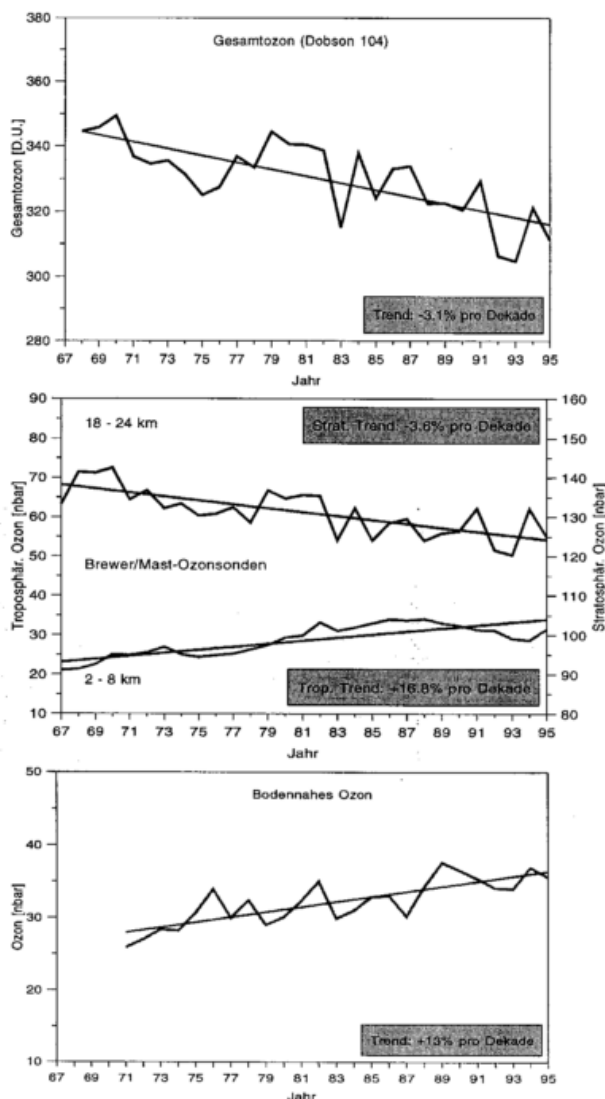


Bild 5: Jahresmittelwerte des Ozongehaltes über Hohenpeißenberg seit 1967, unten: Bodennah in 998 m Meereshöhe, mitte: In der Troposphäre zwischen 2 und 8 km und im Ozonmaximum in der Stratosphäre zwischen 18 und 24 km Höhe, oben: Gesamtozon.

mogenisierten Hohenpeißenberger Ballonsondendaten dargestellt. Für den gesamten Höhenbereich 18-24 km beträgt die mittlere Abnahmerate -3.6% pro Jahrzehnt, was einem Ozonverlust von 10% seit Ende der sechziger Jahre gleichkommt. Eine noch stärkere Ozonabnahme tritt bei annähernd 40 km Höhe auf (s. Artikel von STEINBRECHT), wo nach den Messungen mit dem Hohenpeißenberger Lidar Raten von etwa -1 bis -2% pro Jahr! registriert werden. Bild 6 demonstriert übersichtlich die am Hohenpeißenberg gemessenen Ozontrends als relative Änderung pro Jahr in Abhängigkeit von der Höhe. Allerdings muß einschränkend angemerkt werden, daß die Lidarzeitreihe erst seit 1987 besteht und damit für eine Trendanalyse zu kurz ist. Da dieses Ergebnis jedoch nach verhältnismäßig kurzer Zeit Modellrechnungen bestätigt, die den stärksten chlorbedingten Ozonabbau für die Höhenregion um 40 km berechneten, muß es besonders hervorgehoben werden.

4.3 Gesamtozon

Etwa 90 % des Gesamtozons sind in der Stratosphäre konzentriert. Starke Änderungen des stratosphärischen Ozons und hier insbesondere im Ozonmaximum bei etwa 20 km Höhe, sollten sich in Gesamtozonzeitreihen wiederfinden. Es sei denn, die troposphärische Ozonzunahme ist so stark, daß es zu einer Kompensation kommt, was am Hohenpeißenberg bis in die achtziger Jahre der Fall war. Wie die Zeitreihe des Gesamtozons seit 1968 zeigt (Bild 5 oben), vermindert sich das Ge-

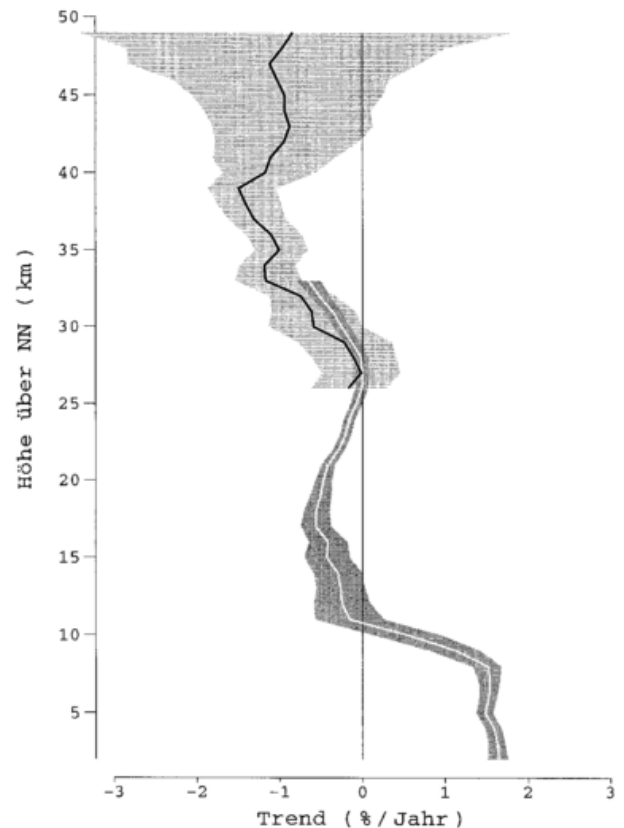


Bild 6: Relative Ozonänderung in Abhängigkeit von der Höhe. Sonde (Jan. 1967 – Okt. 1995) bis 33 km, Lidar (Okt. 1987 – Okt. 1995) 26-48 km Höhe. Die graue Schraffur markiert die Standardabweichung der zugrundeliegenden Monatsmittel.

samtozon im Mittel um etwa 3% pro Jahrzehnt, wobei durch das Pinatubo-aerosol in den Jahren 1992/93 eine zusätzliche Trendverstärkung eingetreten ist. Andererseits zeigen die Werte der letzten beiden Jahre, in denen das Pinatubo-aerosol schon wieder die Stratosphäre verlassen hatte, keine „Erholung“ auf das alte Niveau, sondern sie liegen nach wie vor im langfristig abwärtsgerichteten Trend. Allerdings besteht auch gegenwärtig, Mitte der neunziger Jahre, eine Disposition für etwas erniedrigte Gesamtozonwerte seitens des 11-jährigen Sonnenzyklus und seitens der ausklingenden östlichen Phase der quasi-zweijährigen Oszillation der Atmosphäre (QBO). Die Sonnenaktivität erreichte 1996/97 ihr Minimum, hierdurch ist zur Zeit mit einer zusätzlichen Gesamtozonabsenkung von etwa 1% zu rechnen (CHANDRA und McPETERS 1994). Der QBO-Beitrag dürfte bei etwa -2% liegen. Stellt man den Trend als Funktion der Jahreszeiten dar, zeigen sich saisonale Unterschiede. Die durchschnittliche Ozonabnahme ist im jahreszeitlichen Ozonmaximum im Winter/Frühjahr mit -4 bis -6% pro Jahrzehnt am größten, während im herbstlichen Minimum nur etwa -2% zu verzeichnen sind. Die am Hohenpeißenberg gemessenen Trends sind sehr gut abgesichert. Immer wieder vorgenommene Vergleiche mit Ergebnissen anderer Stationen und von Satellitensystemen zeigen eine sehr gute Übereinstimmung (Bild 7). Diese Graphik stellt auch die Breitenabhängigkeit der Gesamtozontrends dar. Während in den Tropen kaum ein eindeutiger Trend festzustellen ist, nehmen in beiden Hemisphären die Ozondefizite mit zunehmender Breite zu. Auf der Nordhalbkugel sind ab 55° Breite mit -4 % dann die größten Abnahmeraten erreicht; auf der Südhalbkugel steigert sich die Abnahmerate in Richtung antarktisches Ozonloch bis auf -10% pro Jahrzehnt (WMO 1995). Hieran wird die globale Dimension der Ozonverluste deutlich, es gibt praktisch keine Breiten in denen das Gesamtozon zunimmt. Dynamische Effekte mögen in manchen Breiten und für begrenzte Zeiträume sicherlich eine nicht zu unterschätzende Rolle spielen, treten aber als Begründung für langfristige, globale Ozonverluste in den Hintergrund.

5 Ozonabbau durch Vulkanaerosole

Bereits durch den Ausbruch des Vulkans El Chichon 1982 wurden gewaltige Mengen Vulkanasche bis in die untere Stratosphäre geschleudert, die sich dort immer weiter ausbreitete und als Aerosolwolke etwa 2 Jahre um die Erde driftete. Es zeigte sich weltweit ein verstärkter Ozonrückgang, der sich z. B. in der längsten Gesamtozonreihe der Erde (Arosa CH, seit 1926) in einem Rekordminimum niederschlug (DÜTSCH 1985) und in den Zeitreihen des Hohenpeißenberg (JÄGER und WEGE 1990) ebenfalls klar erkennbar ist. Anfangs war es sehr umstritten, inwieweit diese Minima auf die Aerosole zurückzuführen seien. Auch nach dem noch stärkeren Ausbruch des Mt. Pinatubo auf den Philippinen bildete sich wieder eine dichte, sich weltweit ausbreitende Aerosolschicht, die auch mit dem Hohenpeißenberger Ozonlidar gut beobachtet werden konnte (s. Farbplot im Artikel von STEINBRECHT). Erneut gingen



Bild 7: Breitenabhängige Ozontrends in % pro Dekade, gemessen mit Dobson-Spektrophotometern und Satellitensystemen (SBUV und TOMS). (Quelle: WMO 1995)

die Ozonwerte so stark zurück, daß über viele Monate hinweg die bis dahin niedrigsten Werte in den langen Beobachtungsreihen registriert wurden (CLAUDE et al. 1994a). Dabei geht man heute davon aus, daß mehrere Effekte den temporären Ozonverlust verursachten. So führte die massive Erhöhung von Sulfataerosolen in der unteren Stratosphäre einerseits zu einer veränderten Chemie, die direkt den photochemischen Ozonabbau intensiviert. Andererseits wirkten die Aerosole insbesondere in den Tropen als zusätzliche, stratosphärische Heizschicht, wodurch die allgemeine Zirkulation gestört wurde, was sich indirekt ebenfalls ozonvermindernd auswirkte (z. B. WMO 1995).

6 Ozon und Temperatur

Ozon und Temperatur sind in der Erdatmosphäre sehr eng miteinander verknüpft. Das zeigt sich beispielsweise schon daran, daß das Wiederanstiegen der Temperatur mit der Höhe in der Stratosphäre auf die Strahlungsabsorption durch Ozon zurückzuführen ist. In weiten Bereichen der Atmosphäre ist häufig auch eine sehr hohe zeitliche Korrelation zwischen Ozon und der Temperatur zu beobachten. Die Korrelation zwischen der Temperatur in der unteren Stratosphäre (50 und 100 hPa Niveau) und dem Gesamtozon (MEETHAM 1936, BOJKOV 1964) ist z. B. schon lange bekannt und wegen der Dominanz der Dynamik in dieser Region so hoch, daß sie zum Auffinden (nicht zur Korrektur!) von Inhomogenitäten in langen Ozonreihen gut geeignet ist (KÖHLER 1995). Die Dynamik bewirkt kurzfristig sowohl beim Ozon als auch bei der Temperatur zumeist gleichgerichtete Änderungen, die von horizontaler Advektion wie auch von Vertikalbewegungen herrühren können. Wie sehen nun diesbezüglich die langfristigen Änderungen in der langen Hohenpeißenberger Sondierungsreihe aus? Hierzu sind in Bild 8 die Vertikalprofile von Ozon und Temperatur dargestellt und zwar als Mittelprofil vom Beginn der Meßreihe (1967-71) und aus den letzten Jahren (1990-94). In diesem gut 20 Jahre umfassenden Zeitraum erwärmte sich die Troposphäre um etwa 1 Grad, während sich die untere Stratosphäre gleichermaßen abkühlte. Dies war mit einer Anhebung der

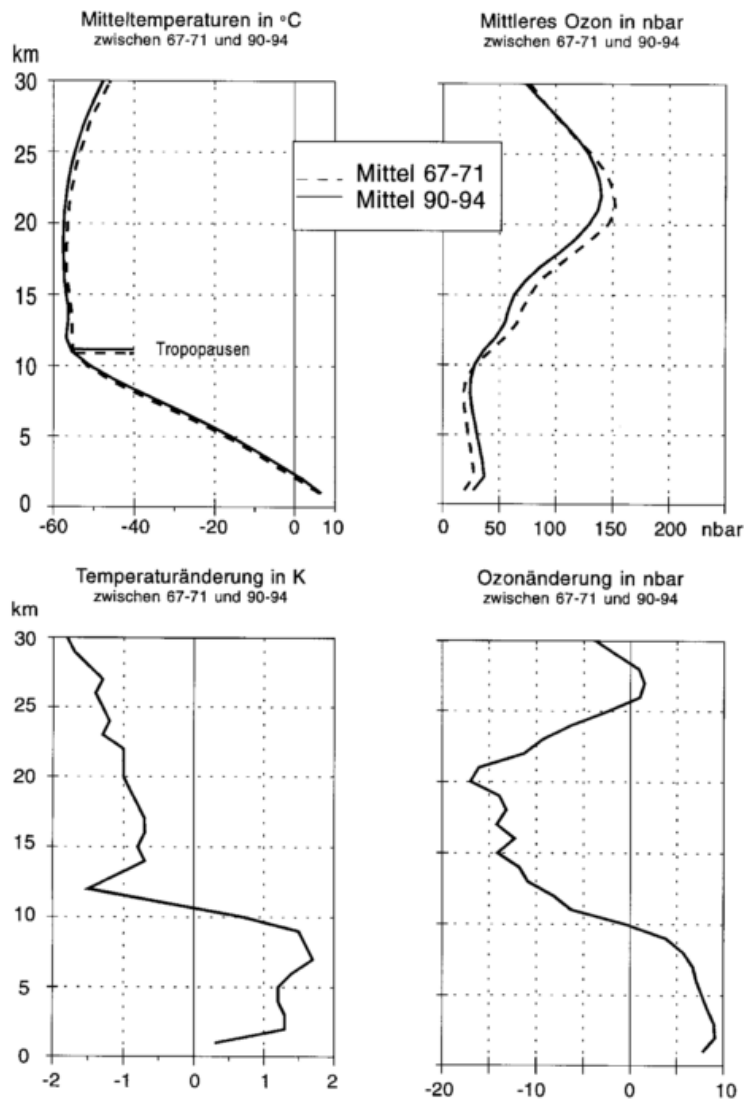


Bild 8: Vergleich der Mittelprofile von Temperatur und Ozon zu Beginn und aus den letzten Jahren der Hohenpeißenberger Ozonsondierungen. In der unteren Hälfte sind die entsprechenden Differenzen dargestellt.

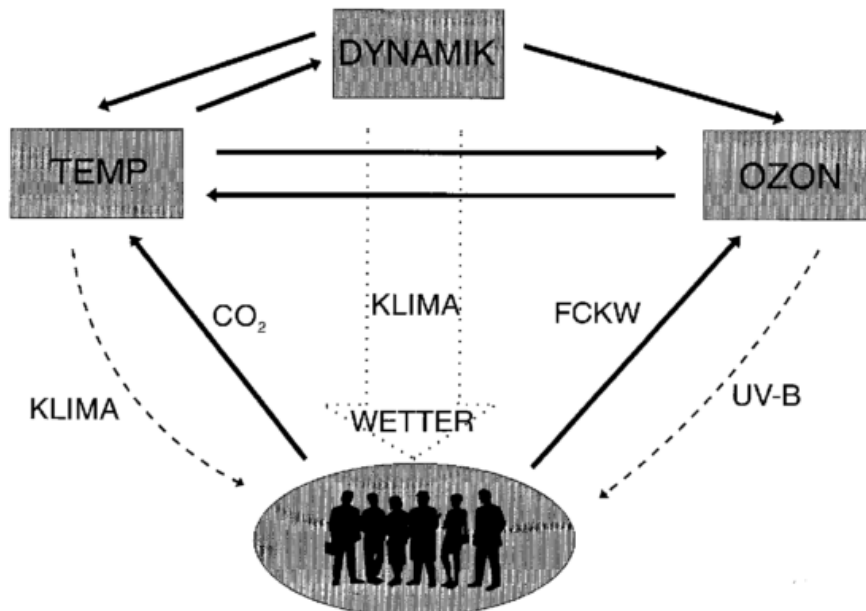
Tropopause um ca. 400 Meter verbunden. Zusammen mit den langfristigen Änderungen im Ozonprofil, Zunahme in der Troposphäre – Abnahme in der Stratosphäre, läßt dies interessante Schlüsse zu. Ozon ist aufgrund seiner Strahlungsabsorption klimawirksam. Auch langfristig kann weniger (mehr) Ozon auf diesem Wege durchaus temperatursenkend (-erhöhend) wirken. Zwar suggerieren die beobachteten Verschiebungen im Temperatur- und Ozonprofil die Richtigkeit dieses Kausalzusammenhanges, Zweifel sind jedoch angebracht. Dies gilt sicherlich für die Troposphäre, wo andere Komponenten des anthropogenen Treibhauseffektes eine größere Rolle spielen als der Ozonanstieg, mag aber auch für die Stratosphäre bezweifelt werden. Die Einbeziehung der bisher gemessenen Ozonabnahme in Modellsimulationen der allgemeinen Zirkulation (und nur damit lassen sich bisher solche Fragen beantworten) liefern noch keine eindeutigen Ergebnisse, die als Beweis zu werten sind, daß die stratosphärische Abkühlung eine Folge der Ozonabnahme ist (GRAF et al. 1995). Auch die umgekehrte Kausalkette wäre denkbar: Eine Klimaänderung (anthropogen oder nicht) sorgt für eine veränderte Zirkulation mit einer Erwärmung der Troposphäre, Anstieg der Tropopause, Abkühlung der unteren Stratosphäre.....und eben einer dementsprechen-

den Änderung im Ozonprofil. Um an dieser Stelle keine Mißverständnisse aufkommen zu lassen, ist folgendes zu bemerken: Die genannten Zusammenhänge stellen nur zwei mögliche und denkbare Ursache-Wirkungskomplexe vor. Sie sollen demonstrieren, wie schwierig es ist, in dem komplexen und vielfach rückgekoppelten, nicht-linearen System Atmosphäre, eindeutig Ursache und Wirkung zu identifizieren und wissenschaftlich zu quantifizieren. Bild 9 soll als Skizze diesen Rückkopplungsmechanismus veranschaulichen, wobei zusätzliche und wesentliche „Mitspieler“, wie beispielsweise die Sonne oder die Ozeane, gar nicht erwähnt sind. Greift der Mensch nun an verschiedenen Stellen in dieses vernetzte System ein, und wir wissen, daß diese Eingriffe mittlerweile massive Formen angenommen haben, kommt es zu Störungen in den natürlichen Regelkreisläufen, die von der Wissenschaft nur mit großen Anstrengungen überblickt und verstanden werden können.

7 Qualitätskontrolle

Neben der Durchführung und der Interpretation anspruchsvoller Messungen ist die ständige Qualitätskontrolle aus einem Observatoriumsbetrieb nicht wegzudenken. Hierbei ist weniger an das bloße Überprüfen

Bild 9: Vereinfachtes Schema atmosphärischer Wechselwirkungen.



von Daten gedacht, sondern vielmehr an das Aufspüren versteckter Fehlerquellen, das Überarbeiten der Meßverfahren, das Erstellen von Richtlinien, Betreuung von Meßstationen ohne Wissenschaftlerbegleitung und die Durchführung von Instrumentenvergleichen. Auch diesen Aufgaben wurde am Meteorologischen Observatorium Hohenpeißenberg schon frühzeitig die notwendige Aufmerksamkeit gewidmet: Der erste internationale Ozonsondenvergleich fand 1970 auf dem Hohenpeißenberg statt, ein zweiter folgte 1978 (ATTMANNSPACHER und DÜTSCH, 1970 und 1980). Die gängigsten Analysatoren zur Messung bodennahen Ozons wurden in einem Langzeitvergleich ebenso kritisch untersucht wie das Dobson- und das Brewer-Spektrometer (ATTMANNSPACHER und HARTMANNSTRUBER 1982, KÖHLER et al. 1989). Eine wichtige Konsequenz aus diesen Vergleichen war das Ozonmeßprogramm dauerhaft redundant ausulegen, was in der Praxis eine Vervollständigung der Instrumentierung bedeutete (Beschaffung des Brewer-Spektrometers 1982, Installation des Lidar-Systems 1987, drei Meßmethoden bei der Messung bodennahen Ozons). Durch diese Redundanz ist eine laufende wechselseitige Kontrolle gewährleistet. Sie führte z. B. dazu, daß die seit nahezu 30 Jahren von allen Brewer/Mast Sondierungsstationen angewendete Pumpenkorrektur als fehlerhaft aufgedeckt und experimentell neu bestimmt wurde (STEINBRECHT et al. 1996). Mit der Erstellung eines Leitfadens zur Vorbereitung, Durchführung und Auswertung von Ozonsondierungen wurde im Auftrag der WMO allen Anwendern der Brewer-Mast Ozonsonde eine einheitliche Verfahrensweise an die Hand gegeben (CLAUDE et al. 1987). Manche Fehler sind unvermeidbar und wurden ohne auf Anhieb die Folgen abzu sehen gemacht, wie z. B. bei Geräteverbesserungen. Hier bleibt nichts anderes übrig, als hinterher die Meßreihen zu homogenisieren (KÖHLER 1995, KÖHLER in diesem Heft) und die bis dahin getroffenen wissenschaftlichen Interpretationen neu zu bewerten. Die flächendeckenden Ozonmessungen durch Satelliteninstrumente bedürfen einer Kontrolle durch hochzuverlässige, eta-

blierte Meßsysteme. Auch hierfür sind die Hohenpeißenberger Messungen immer wieder gefordert (BRÜHL et al. 1996, BITTNER 1994, KÖHLER 1995). Schließlich hat das Observatorium Hohenpeißenberg für die Region Europa die Aufgabe eines Regionalen Ozonzentrums der WMO übernommen, was unter anderem die Kalibrierung aller europäischer Dobsonggeräte in etwa 4-jährigem Turnus bedeutet.

8 Beurteilung der gegenwärtigen Entwicklung, Ausblick

Die Atmosphäre unserer Erde ist kein statisches Gebilde, das mit Hilfe physikalischer und chemischer Gleichungen erschöpfend beschrieben und durchschaut werden kann. Ihr Zustand scheint in fortwährender Änderung begriffen, die auf den unterschiedlichsten Zeitskalen ablaufen, ein Netzwerk von Rückkopplungsmechanismen sorgt für Komplexität. Die ständig wachsende Erdbevölkerung und deren Aktivitäten greifen immer mehr in diese Prozesse ein, wobei der wissenschaftliche Kenntnisstand bisher zumeist so begrenzt war, daß kaum eine der eingetretenen, tiefgreifenden Veränderungen der letzten Jahre absehbar war. Ausnahmsweise die stratosphärische Ozonabnahme wurde von Molina und Rowland aufgrund ihrer Laboruntersuchungen vorausgesagt. 1995 bekamen hierfür beide den Nobelpreis für Chemie, zusammen mit Paul Crutzen, der große wissenschaftlichen Verdienste bei der Erforschung der Ursachen des antarktischen Ozonlochs vorzuweisen hat. Lange Meßreihen stellen nicht nur beim Ozon die wichtigste Grundlage zur Beurteilung der gegenwärtigen Lage dar. Da die herausragende Rolle dieses Spurengases schon frühzeitig erkannt wurde, liegen hier mehrere längere Meßreihen vor. Im allgemeinen zeigen diese Reihen bis auf wenige Ausnahmen besorgniserregende Entwicklungen mit weiterreichenden Folgen, die zumindest ebenso kritisch sind. Dies gilt für die stratosphärische Ozonabnahme, sei es schleichend aber stetig in den gemäßigten und polaren Breiten oder sei es vorübergehend aber wiederkehrend in der massiven Form des Ozonloches. Es gilt genauso für das zunehmende

troposphärische Ozon, insbesondere als Sommersmog im menschlichen Lebensraum. Unbestreitbar vorhandene Kenntnislücken dürfen nicht zur Problemverdrängung führen. Politische Entscheidungen und persönliches Handeln sollten sich an den zahlreichen Fakten und nicht an noch vorhandenen Unsicherheiten orientieren. Natürlich kann es sein, daß ein Teil der beobachteten Klimaänderungen natürlichen Ursprunges sind und so oder so eingetreten wären. Nicht jedes größere Unwetter fällt in menschliche Verantwortung. Auch beim Ozon treten bei weitem nicht nur anthropogene Änderungen auf, wie z.B. die zusätzlichen vulkanbedingten Ozondefizite zeigen. Auch wenn es beim Ozon im Vergleich zum Klima etwas einfacher zu sein scheint, anthropogene Einflüsse von natürlichen zu trennen, wird die internationale Forschung weiterhin größte Anstrengungen unternehmen müssen um Wissensdefizite zu schließen.

Literatur

- ATTMANNSPACHER, W., 1969: Ozone and temperature change in the upper stratosphere, *Ann. Geophys.* 25, Nr. 1, 301-305
- ATTMANNSPACHER, W. und DÜTSCH, H.U., 1970: International Ozone Sonde Inter-comparison at the Observatory Hohenpeißenberg, *Ber. d. DWD* 120.
- ATTMANNSPACHER, W., 1971: Ein einfaches, naßchemisches Gerät mit geringer Trägheit zur Messung des bodennahen Ozons der Atmosphäre, *Met. Rdschau*, Nr. 6, 183-188.
- ATTMANNSPACHER, W., HARTMANNGRUBER, R., 1975: 6 Jahre (1967-72) Ozonsondierungen am Meteorologischen Observatorium Hohenpeißenberg, *Berichte des DWD*, Nr. 137.
- ATTMANNSPACHER, W. und DÜTSCH, H.U., 1980: Second International Ozonesonde Intercomparison at the Observatory Hohenpeißenberg 5.-20. April 1978, *Ber. d. DWD* 157.
- ATTMANNSPACHER, W., HARTMANNGRUBER, R., 1982: Intercomparison of Instruments measuring ozone near the ground at Hohenpeißenberg Observatory, *Ber. d. DWD*, Nr. 161.
- ATTMANNSPACHER, W., HARTMANNGRUBER, R., 1980: Trend and extreme values of 8 years continuous measurements of ozone near the surface at the Meteorological Observatory Hohenpeissenberg, *Proc. Quad. Ozone Symp.*, Boulder.
- ATTMANNSPACHER, W., HARTMANNGRUBER, R., LANG P., 1984: Verbesserung der Grundkenntnisse über die Klimatologie der vertikalen Ozonschicht durch verstärkte Ballonsondierungen, *BPT-Bericht 6/84*, Gesellschaft für Strahlen und Umweltforschung, München.
- BITTNER, M., 1994: The CRISTA/MAHRSI Campaign, *STEP-Journal*, Vol. 4, Nr. 10, 6-10.
- BOJKOV, R.D., 1964: Variations in the total ozone content and their relation to temperature variations in the stratosphere, *Geomag. Aeron.*, Nr. 4, 137-140.
- BRÜHL, CH., DRAYSON, R., RUSSEL, J.M. III, CRUTZEN, P., McINERNAY, J.M., PURCELL, P.N., CLAUDE, H., GERNANDT, H., McGEE, TH., McDERMID, I.A., GUNSON, M.R., 1996: Halogen Occultation Experiment ozone channel validation, *JGR*, Vol. 101, D6, 10217-10240.
- BRÜHL, C., DIER, H. und RUSSELL, J., 1996: Starke Ozonzerstörung Anfang März über Nordwesteuropa beobachtet, *Ozonbulletin des DWD*.
- CLAUDE, H., HARTMANNGRUBER, R. und KÖHLER, U., 1987: Measurement of Atmospheric Ozone Profiles using the Brewer/Mast-Sonde, *WMO-Report No. 17*.
- CLAUDE, H., VANDERSEE, W., WEGE, K., 1994a: On long-term Ozone Trends at Hohenpeißenberg, *Proceedings of the Quadrennial Ozone Symposium*, Charlottesville, Virginia, June 4-13, 1992, *NASA Conference Publ.* 3266.
- CLAUDE, H., 1994: 25 Jahre Ozonforschung auf dem Hohenpeißenberg, *Highlights und Entwicklung*, In: *Observation und Simulation der Atmosphäre*, *Annalen der Meteorologie*, 29.
- CLAUDE, H., SCHÖNENBORN, F., STEINBRECHT, W. und VANDERSEE, W., 1994: New Evidence for Ozone Depletion in the Upper Stratosphere, *Geophysical Research Letters*, 21, 2409-2412.
- CLAUDE, H., KÖHLER, U., STEINBRECHT, W. und VANDERSEE, W., 1996: Ozon-Miniholes über dem europäischen Nordmeer, *Ozonbulletin des DWD*.
- CHANDRA, S. und R. McPETERS, 1994: The solar cycle variation of ozone in the stratosphere inferred from Nimbus 7 and NOAA 11 satellites, *JGR*, 99, Nr. D10.
- DOBSON, G.M.B., D.N. HARRISON, J. LAWRENCE; 1929: Measurement of the amount of ozone in the earth's atmosphere and its relation to other geophysical conditions : Part III, *Proc. Royal Soc. London*, A122, 456-486.
- DÜTSCH, H.U., 1985: Total ozone trend in the light of ozone soundings, *The impact of El Chichon*, *Atmospheric Ozone*, Hrsg. Chr. Zerefos, A. Ghazi, Reidel Verl., Dordrecht.
- GRAF, H.F., PERLWITZ, J., KIRCHNER, I. und SCHULT, I., 1995: Rezente winterliche Klimaänderung auf der Nordhemisphäre, *Ozonänderung und zunehmender Treibhauseffekt*, *Annalen der Meteorologie*, 31.
- HARTMANNGRUBER, R., 1973: Vertikales Ozonprofil und Änderung im troposphärischen Wettergeschehen, *Annalen der Meteorologie*, NF, Nr. 6, 237-240.
- JÄGER, H. und WEGE, K., 1990: Stratospheric Ozone Depletion at Northern Midlatitudes after major Volcanic Eruptions, *J. Atmos. Chemistry*, 10, 237-287.
- KÖHLER, U., CLAUDE, H., HARTMANNGRUBER, R., WEGE, K., 1989: Vergleich und Bewertung von zwei Spektrophotometern zur Messung des Gesamtzons, *Meteorol. Rdsch.* 42, Heft 1, S. 1-9.
- KÖHLER, U., 1995: Homogenization and re-evaluation of the long-term ozone series at the Meteorological Observatory Hohenpeissenberg, *Arbeitsergebnisse der Abt. Forschung, DWD*, 31, Offenbach.
- LAUSCHER, F., 1984: Ozonbeobachtungen in Wien von 1853 bis 1981. Zusammenhänge zwischen Ozon und Wetterlagen,

- Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Publik. Nr. 284
- LOGAN, J., 1994: Trends in the vertical distribution of ozone: An analysis of ozonesonde data, JGR, 99, Nr. D12.
- MEETHAM, A.R., 1936: Correlation of atmospheric ozone with other geophysical characteristics of the atmosphere. Quart. Journ. Roy. Met. Soc., 63, 289-307.
- PAETZOLDT, K., B. NAUJOKAT, K. NEUGEBOHREN, 1994: Correlation between stratospheric temperature, total ozone and tropospheric weather systems, GRL, Vol.21, Nr. 13, 1203-1206.
- SLADKOVIC, R., SCHEEL, H.E. und SEILER, W., 1994: Ozone climatology at the mountain sites, Wank and Zugspitze, Proc. EUROTRAC Symp. by P.M. Borrell, Academic Publishing, Den Haag, Niederlande.
- STEINBRECHT, W., SCHWARZ, R. und CLAUDE, H., 1996: New Pump Correction for the Brewer/Mast Ozone Sonde: Experimental Determination and Application to Instrument Intercomparisons, eingereicht bei J. Atmosph. Oceanic Technology
- TARASICK, D.W., D.I. WARDLE, J.B. KERR, J.J. BELLEFLEUR und J.DAVIES, 1995: Tropospheric ozone trends over Canada: 1980-1993, GRL, Vol. 22, Nr.4
- VANDERSEE, W., WEGE, K., WEIGL, E., CLAUDE, H., 1993: Ozonstudien am Hohenpeissenberg, Berichte des DWD Nr. 184.
- WEGE, K. und H. CLAUDE, 1994: On a period with very low ozone concentrations within the lower stratosphere, GRL, Vol. 21, Nr. 13, 1395-1398.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION; 1995: Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1994, Report No. 37, Global Ozone Research and Monitoring Project, Geneva.

6 Das Lidar am Hohenpeißenberg: Ein leistungsstarkes und vielseitiges Instrument für Langzeitmessungen in der Stratosphäre

1 Hintergrund

Die photochemische Lebensdauer eines Ozonmoleküls in der Stratosphäre beträgt etwa 1 Stunde in 50 km Höhe (1 hPa), 1 Tag in 40 km (3 hPa), 1 Woche in 30 km (10 hPa) und 1 Jahr in 20 km (50 hPa) (DÜTSCH 1971, WARNECK 1988). Damit wird die Ozonverteilung in der oberen Stratosphäre im wesentlichen von der Photochemie bestimmt, in der unteren Stratosphäre dagegen im wesentlichen von Transportvorgängen. Die Übergangzone zwischen dem vom Transport geprägten Bereich und dem photochemisch dominierten liegt in mittleren Breiten bei etwa 25 km (20 hPa). Bild 1 zeigt den Ozon-Jahresgang für verschiedene Höhen in der Stratosphäre, ermittelt aus den Lidarmessungen am Hohenpeißenberg. Deutlich erkennbar ist der Unterschied zwischen dem photochemisch geprägten Bereich, z.B. in 35 km Höhe, mit dem Konzentrationsmaximum zur Zeit des Sonnenhöchststandes im Sommer, und dem vom Transport geprägten Bereich unterhalb von 25 km, wo das Maximum im Frühjahr auftritt. Einen ganz ähnlichen Jahresgang zeigen auch die Lidarmessungen der amerikanischen Station auf dem Table Mountain in Kalifornien (MCDERMID 1993).

Etwa 1974 erkannten Molina und Rowland, daß anthropogene Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe (FCKW) zu einer Zerstörung des Ozons vor allem im photochemisch geprägten Bereich führen können. Der Mechanismus läßt sich vereinfacht folgendermaßen darstellen: Durch harte UV Strahlung in der oberen Stratosphäre kann aus den sonst extrem langlebigen Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffen (FCKWs) Chlor abgespalten werden. Es entstehen Chlorradikale, die mit Ozonmolekülen reagieren können. In einem katalytischen Zyklus werden dabei zwei Ozonmoleküle zerstört, das Chlorradikal jedoch zurückgebildet. Es steht so für immer weitere Zerstörungszyklen zur Verfügung. Sehr bald zeigten Modellrechnungen (BRÜHL und CRUTZEN 1988, WMO 1989), daß die größte Ozonabnahme in etwa 40 km Höhe zu erwarten sei.

Allerdings war es zu Anfang der 80er Jahre meßtechnisch extrem schwierig, regelmässig genaue Ozonmessungen in diesem Höhenbereich durchzuführen. Die naßchemischen Meßverfahren der Ballonsonden versagen oberhalb von etwa 6 hPa (32 km) – denn dort wird der Tripelpunkt von Wasser überschritten. Bodengestützte Messungen mit Dobson oder Brewer Spektrometern können zwar nach der Umkehrmethode Ozonprofile messen (es wird die Veränderung des Himmelslichtspektrums mit dem Sonnenstand zur ungefähren Bestimmung des Ozonprofils ausgenutzt), das ist aber nicht sehr genau, und die Resultate können von vielen Einflüssen verfälscht werden. Satellitenmessungen hatten damals noch nicht die nötige technische Reife erlangt. Sie sind im allgemeinen auch heute noch wegen

möglicher Veränderung des Satelliten (z.B. Alterung optischer Komponenten) und wegen der komplizierten und oft nicht eindeutig bestimmten Inversionstechniken nur durch Aneicherung an Bodenstationen über längere Zeit stabil zu halten.

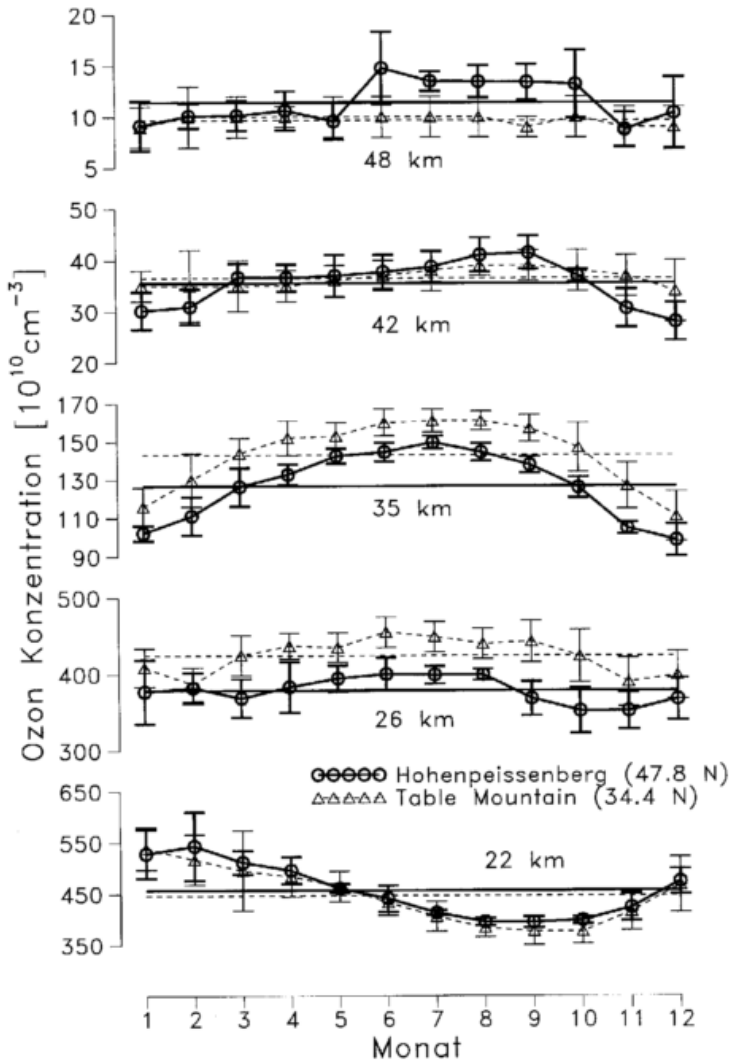
Es gab also Anfang der 80er Jahre klare Aussagen über eine zu erwartende Ozonzerstörung in etwa 40 km Höhe, aber praktisch keine genaue Meßmethode. Einen Ausweg schien die erstmals Ende der 70er Jahre zur Ozonmessung verwendete LIDAR-Methode (LIDAR = Light Detection and Ranging, ähnlich RADAR) zu bieten. Im nächsten Abschnitt wird diese Meßmethode genauer beschrieben, hier soll zunächst auf ihre historische Entwicklung eingegangen werden.

Die ersten zur Ozonmessung eingesetzten Lidar-Systeme (MEGIE et al. 1977, UCHINO et al. 1978) hatten noch mit einer Reihe von technischen Problemen, vor allem bei den verwendeten Lasern zu kämpfen. Aber durch Einsatz eines fortschrittlichen XeCl Excimerlasers und die sehr elegante Verwendung von Ramanstreuung zur Erzeugung der nötigen zweiten Wellenlänge gelang WERNER, ROTHE und WALTHER (1983) von der Universität München der Bau eines relativ zuverlässigen Ozon-Lidars. Die Münchner Gruppe betrieb dieses System über mehrere Jahre (1981-1984) auf der Zugspitze – etwa 40 km vom Hohenpeißenberg entfernt. Natürlich fanden Vergleiche mit den schon lange etablierten Brewer/Mast Sonden des Hohenpeißenberges statt, mit sehr vielversprechender Übereinstimmung (siehe auch Bild 7).

Am Hohenpeißenberg wurde das Potential der neuen Meßmethode vom damaligen Leiter Dr. W. Attmannspacher klar erkannt. Mit dem Lidar ließ sich vor allem der mit der Sonde nicht erreichbare Höhenbereich von 30 bis 50 km abdecken, für den ja die größte Ozonabnahme durch anthropogenes Chlor vorhergesagt wurde. Vom BMFT konnten Fördermittel gewonnen werden, und in Zusammenarbeit mit der Gruppe an der Universität München wurde eine verbesserte Ausführung des Zugspitz-Lidars auf dem Hohenpeißenberg aufgebaut. Für die Beschreibung des technischen Aufbaus sei hier auf GEH (1987) und CLAUDE et al. (1989) verwiesen. Seit 1987 werden mit diesem Gerät in fast jeder klaren Nacht (s. nächster Abschnitt) Messungen durchgeführt.

Mittlerweile existieren weltweit etwa 15 bis 20 Ozon-Lidars, die zum Teil erheblich leistungsfähiger sind, als das auf dem Hohenpeißenberg. Bei der Entwicklung von 4 dieser komplexen Systeme war der Autor erheblich beteiligt. Die meisten Systeme werden auf Stationen des Network for the Detection of Stratospheric Change (NDSC) betrieben. Ziel des NDSC ist es, langfristige,

Bild 1: Ozonklimatologie aus Lidarmessungen am Hohenpeißenberg (Breite 47.8° N) und am Table Mountain, Kalifornien (Breite 34.4° N).



hochgenaue und miteinander vergleichbare Messungen einer Reihe stratosphärischer Parameter an verschiedenen Stationen auf der Erde durchzuführen und damit eine Datenbasis für die frühzeitige Erkennung von langfristigen Veränderungen der Stratosphäre bereitzustellen. Lange und dichte Lidar-Meßreihen des stratosphärischen Ozons gibt es zur Zeit jedoch neben dem Hohenpeißenberg nur noch am Observatoire Haute Provence (seit 1985, (MEGIE et al. 1985)) und am Table Mountain in Kalifornien (seit 1988, (MCDERMID 1993)).

2 Meßprinzip eines Lidars

Lidar steht für Light Detection and Ranging. Ein Lidar ist eigentlich das gleiche wie ein Radar, allerdings werden keine Radiowellenpulse (mit Wellenlängen um 1 bis 10 cm) ausgesandt, sondern Lichtpulse, also elektromagnetische Wellen, im Bereich 300 bis 1000 nm. Der ausgesandte Lichtpuls, typischerweise 10^{17} Photonen, wird von Teilchen in der Atmosphäre gestreut. Ein extrem kleiner Teil, aus der gesamten Stratosphäre nur etwa 100 Photonen, gelangt dabei zum Empfänger zurück. Wie beim Radar ergibt die Messung der Laufzeit vom Aussenden des Pulses bis zum Eintreffen des rückgestreuten Lichtes die Entfernung zum Rückstreuer. Wegen der viel kürzeren Wellenlänge tragen aber beim Lidar viel

kleinere Teilchen zur Rückstreuung bei. Während ein Wetterradar auf Regentropfen und Schneekristalle reagiert, werden Lidars zum Nachweis von Aerosolpartikeln (Größenbereich 100 nm bis einige μm), von Luftmolekülen und eben auch von Spurengasen eingesetzt (z.B. MEASURES 1984).

Beim Lidar am Hohenpeißenberg wird Licht im nahen UV, bei 308 und 353 nm, ausgesandt. In der mittleren und oberen Stratosphäre tragen so fast nur Luftmoleküle zur Rückstreuung bei, unterhalb von 30 km auch die Sulfataerosolpartikel der sogenannten Junge-Schicht. Zur Ozonmessung wird aber nicht die Rückstreuung ausgenutzt, sondern die Absorption des ausgesandten UV-Lichtes durch das Ozon – also genau das, was die Ozonschicht als die „Sonnenbrille“ der Erde so wichtig macht. Licht bei 308 nm wird nämlich von Ozonmolekülen stark absorbiert, während bei 353 nm praktisch keine Absorption erfolgt. Vergleicht man nun die Lidar-Rückstreusignale bei den zwei Wellenlängen (Bild 2), so stellt man fest, daß das Signal bei 308 nm (durchgezogene Linie) aufgrund der Ozonabsorption sehr viel stärker mit der Entfernung abfällt, als bei 353 nm (gestrichelte Linie). Der Unterschied der beiden Steigungen in Bild 2 gibt im wesentlichen schon die Ozonkonzentration in der jeweiligen Höhe an.

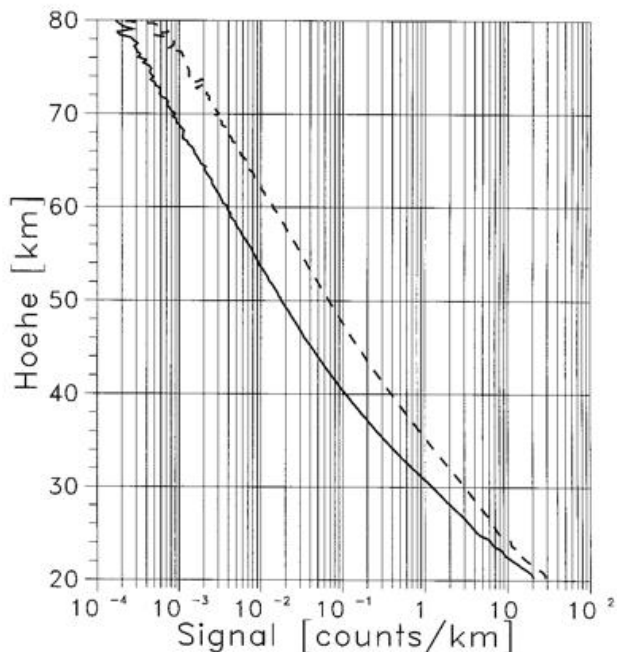


Bild 2: Änderung des Lidarrückstreusignals als Funktion der Höhe auf der Absorptions- (durchgezogene Linie) und Referenzwellenlänge (gestrichelt).

Die Wahl der absorbierten Wellenlänge stellt einen Kompromiß dar. Je kürzer die gewählte Wellenlänge, desto stärker wird die Absorption durch das Ozon (maximale Absorption bei etwa 250 nm). Damit wird das System zwar empfindlicher, aber das Signal fällt sehr stark ab und die Reichweite wird gering. Für stratosphärische Messungen gilt 308 nm als am besten geeignet, auch weil es mit dem XeCl Excimer-Laser eine leistungsstarke Lichtquelle bei dieser Wellenlänge gibt. Als Referenzwellenlänge werden in der Stratosphäre meistens 353 oder 355 nm verwendet, Wellenlängen die sich leicht durch stimulierte Ramanstreuung in Wasserstoff oder mit einem frequenz-verdreifachten Nd:YAG Laser erzeugen lassen.

Voraussetzung für die Ozonmessung mit den meisten Stratosphärenlidars sind klare Nächte – nur bei klarem Himmel kann der Lichtpuls bis in die Stratosphäre und zurück gelangen und nur bei Nacht ist das Untergrundlicht aus dem Himmel schwach genug. Im Durchschnitt wird am Hohenpeißenberg in etwa sieben solcher Nächte pro Monat das Ozonprofil zwischen 15 und 50 km Höhe gemessen. Die Genauigkeit einer Nachtmessung ist besser als 3 % zwischen 15 und 30 km. Darunter fällt sie ab auf 30 % bei 10 km, darüber auf 10 % bei 35 km und 20 % bei 40 km. Bei 50 km beträgt der typische Fehler einer Nachtmessung 100 %. Hauptfehlerquelle oberhalb von 15 km ist das Photonenrauschen des Rückstreusignals, deswegen läßt sich der Fehler durch Mittelung reduzieren und beträgt beim Monatsmittel typischerweise nur noch 4 % in 35 km, 8 % in 40 km und 30 % in 50 km Höhe.

Durch die doppelt differentielle Meßmethode (das Rückstreusignal wird aus zwei verschiedenen Entfernungen und zwischen den zwei Wellenlängen miteinander

der verglichen) geht lediglich der Absorptionsquerschnitt des Ozons in den Meßwert ein, aber keine Apparaturkonstanten, wie Filtertransmission oder Detektorempfindlichkeit.

Damit sind die Lidarmessungen nahezu unempfindlich gegen Veränderung der Apparatur (z.B. Alterung von optischen Komponenten) und kalibrieren sich selbst. Dies ist ein enormer Vorteil, z.B. gegenüber der Sonde, bei der die sorgfältige Vorbereitung erheblichen Einfluß auf die Genauigkeit der Messung hat. Die Lidar-Ozonmessungen sind deswegen besonders für Langzeitmessungen prädestiniert. Im Gegensatz z.B. zur Sonde wird immer mit dem gleichen Instrument gemessen und selbst eventuelle Veränderungen der Apparatur sollten sich nicht auf das Meßergebnis auswirken.

Neben dem Ozonprofil läßt sich aber noch weitere Information über die Atmosphäre aus den Lidardaten gewinnen: Oberhalb von etwa 30 km ist das Lidarsignal (bei 353 nm) direkt proportional zur Luftdichte. Man erhält daher aus der Lidarmessung das Dichteprofil, bis auf einen festen Faktor. Unter der Annahme hydrostatischen Gleichgewichts kann man aus dem relativen Dichteprofil auch das Druckprofil (wieder bis auf einen konstanten Faktor) erhalten. Durch Division von relativem Druck- und Dichteprofil kürzen sich die Faktoren und nach dem idealen Gasgesetz ergibt sich das absolute Temperaturprofil (HAUCHECORNE und CHANIN 1980). Das Lidar am Hohenpeißenberg kann so das Temperaturprofil oberhalb von 30 km bis in etwa 60 oder 70 km Höhe liefern, leistungsfähigere Systeme schaffen sogar 90 km. Die Genauigkeit (Wiederholbarkeit) eines Nachtmittels liegt bei etwa 1 K in 35 km Höhe, 5 K in 50 km und 10 K in 60 km. Bild 3 zeigt ein

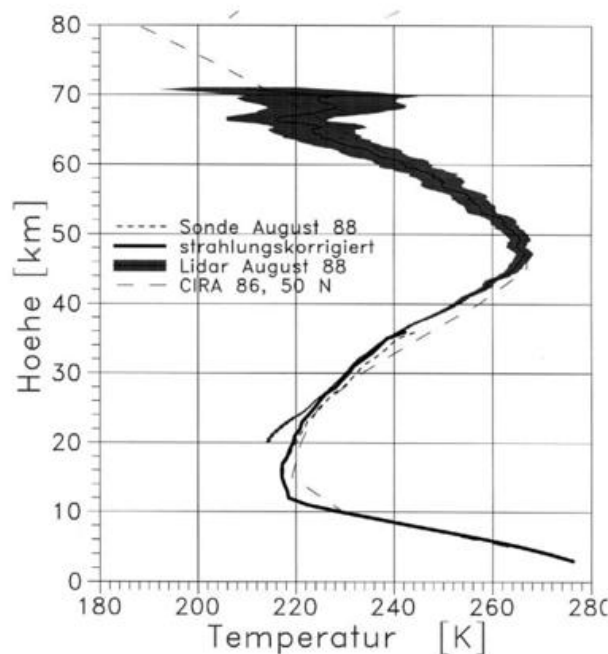
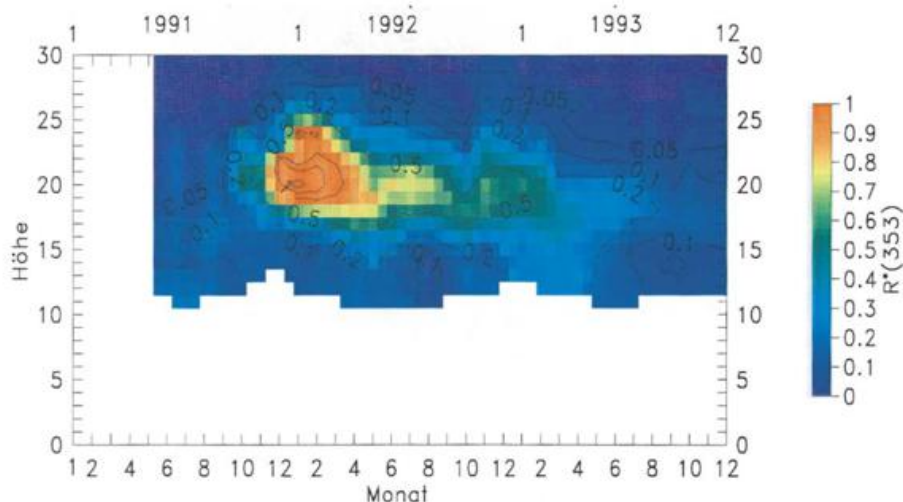


Bild 3: Monatsmittel des Temperaturprofils aus Lidarmessung und Radiosondierung am Hohenpeißenberg. Nach Korrektur des Strahlungsfehlers bei der Sonde ist in diesem Fall die Übereinstimmung sehr gut.

Bild 4: Falschfarbendarstellung des Aerosolrückstreuverhältnisses, gemessen nach dem Pinatuboausbruch mit dem Lidar am Hohenpeißenberg, 1991–1993 (aus Monatsmitteln).



Beispiel mit sehr guter Übereinstimmung zwischen Lidar und Sonde. Aus bis jetzt ungeklärten Gründen zeigt das Lidar zwischen 30 und 35 km Höhe jedoch im Mittel eine um etwa 3 K kältere Temperatur als die Radiosonde (nach Strahlungskorrektur).

Unterhalb von etwa 30 km tragen auch die Aerosole der Junge-Schicht zur Rückstreuung bei. Damit wird die Ableitung der Temperatur aus den Lidardaten unmöglich. Kennt man aber das Luftdichteprofil, zum Beispiel aus einem Radiosondenaufstieg, so läßt sich der Beitrag der Aerosolstreuung berechnen. Das Lidar liefert dann Vertikalprofile der Aerosolrückstreuung, im Bereich zwischen Tropopause und 30 km Höhe (RUSSELL et al. 1979). Bild 4 zeigt als Beispiel die Entwicklung der stratosphärischen Aerosolwolke, die durch den Ausbruch des Vulkans Pinatubo im Juni 1991 auf den Philippinen verursacht wurde und sich in der Folge über die ganze Welt verteilte. Ab August 1991 wurden vom Lidar am Hohenpeißenberg erste Anzeichen registriert, im September 1991 traf die Hauptwolke ein. Das Aerosolrückstreuverhältnis erreichte im Winter 1991/92 Spitzenwerte von 2 bis 3 bei 353 nm. Das bedeutet, daß bei 353 nm 2 bis 3-mal so viel Licht vom Aerosol zurückgestreut wurde, wie von den Luftmolekülen. Entsprechend hoch lag die optische Dichte der Aerosolschicht mit Werten von 0.2. In den Folgejahren sank die Schicht um etwa 2 km pro Jahr ab, gleichzeitig ging das Rück-

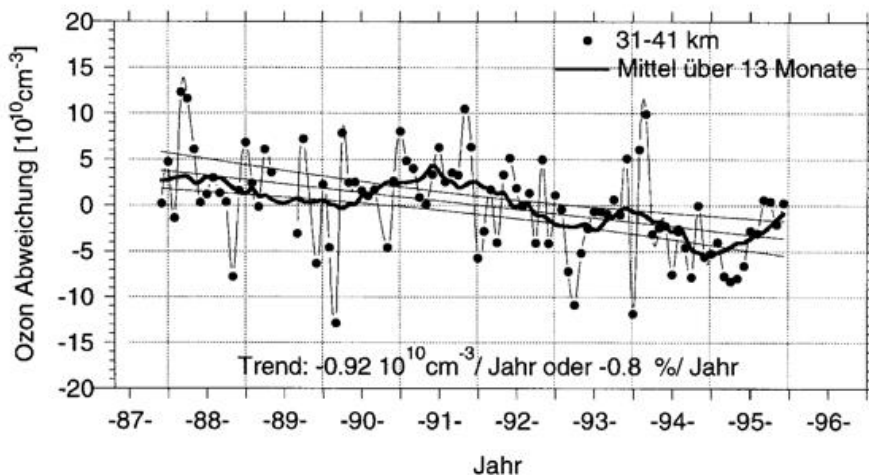
streuverhältnis zurück. Deutlich ist zu erkennen, daß die Aerosolpartikel vor allem im Frühjahr die Stratosphäre verlassen, eine Folge des erhöhten Austausches zwischen Stratosphäre und Tropopause. Seit Ende 1994 ist das Pinatuboaerosol weitestgehend wieder aus der Stratosphäre verschwunden.

3 Hauptergebnisse der Hohenpeißenberger Lidarmessungen

Bild 5 zeigt das mit Abstand wichtigste Ergebnis der Lidarmessungen am Hohenpeißenberg. Gezeigt ist die Abweichung der mittleren Ozonkonzentration zwischen 31 und 41 km vom langjährigen Mittel für die Monate von November 1987 bis Januar 1996. Deutlich ist zu erkennen, daß die Ozonkonzentration um etwa 0.8 % pro Jahr abnimmt. Das Hohenpeißenberger Lidar ist bisher das erste und einzige Lidarsystem mit dem eine statistisch signifikante Ozonabnahme in diesem Höhenbereich nachgewiesen werden konnte (CLAUDE et al. 1994).

In Bild 6 ist der Verlauf des gemessenen Trends als Funktion der Höhe dargestellt. Der dunkelgraue Bereich stellt dabei das Intervall dar, in dem der wahre Wert mit 95 % Wahrscheinlichkeit liegt. Zum Vergleich ist der aus Modellvorhersagen erwartete Trend miteingetragen (hellgrau). Im Rahmen ihres Unsicherheitsbereichs

Bild 5: Abweichung der Monatsmittel der Ozonkonzentration zwischen 31 und 41 km Höhe vom langjährigen Mittel. Im Durchschnitt gehen sieben unregelmäßig verteilte Meßnächte in ein Monatsmittel ein.



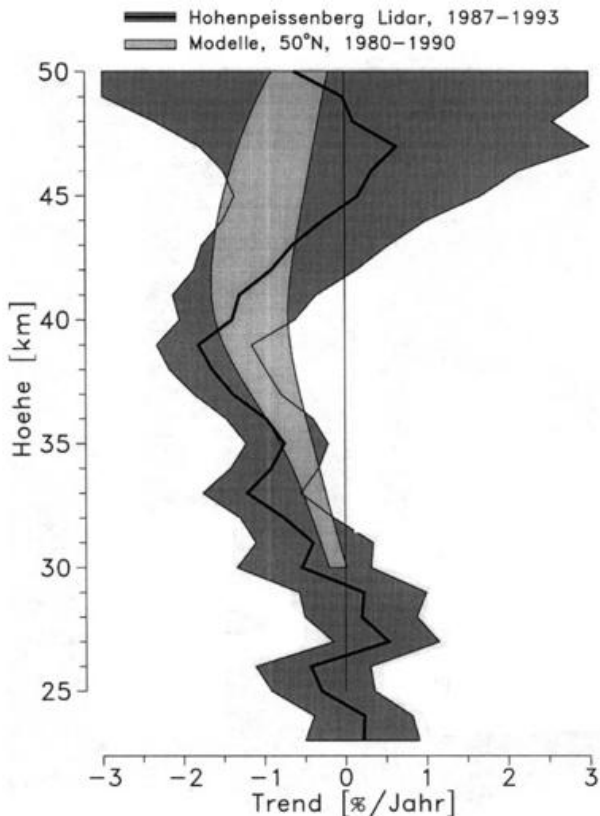


Bild 6: Mit dem Lidar beobachtete Ozonabnahme als Funktion der Höhe (dunkler grauer Bereich) im Vergleich zu Vorhersagen aus Modellrechnungen (heller grauer Bereich). Bei den Lidarmessungen gibt der graue Bereich das 95% Konfidenzintervall an, bei den Modellen umfaßt er in etwa den von verschiedenen Modellen vorhergesagten Bereich.

stimmen beide Ergebnisse recht gut miteinander überein. Andere Meßreihen, z.B. das SBUV Satelliteninstrument zeigen ähnliche Ozonabnahmen, wobei Unstimmigkeiten in den genauen Zahlenwerten zur Zeit bei der NASA und am Hohenpeißenberg weiter untersucht werden. Auf jeden Fall muß davon ausgegangen werden, daß hier der von den Modellen vorhergesagte Ozonabbau durch anthropogene Chlornradikale beobachtet wird. Die Ozonabnahme ist mit über 1 % pro Jahr sehr dramatisch. Sie wirkt sich zwar nur sehr schwach im Gesamt ozon aus (nur etwa 10 bis 20 % des Gesamt ozons liegen oberhalb von 30 km), dennoch muß sie mit großer Sorge betrachtet werden. Erstens dringt nun mehr harte UV-Strahlung in tiefere Schichten der Atmosphäre ein, was dort Veränderungen sowohl in der Photochemie, als auch im Strahlungshaushalt bewirken könnte. Zweitens bestimmt die Absorption von Sonnenlicht durch das Ozon die Temperaturverteilung insbesondere in der oberen Stratosphäre. Mit der Ozonabnahme ist eine Abkühlung der oberen Stratosphäre zu erwarten, mit möglicherweise weitreichenden Folgen für das gesamte Temperaturprofil und damit auch die Zirkulation in der Stratosphäre.

4 Systemvergleiche

Die beobachteten Ozontrends, obwohl bedeutend, sind relativ klein gegenüber der natürlichen Fluktuation.

Beim Gesamt ozon z.B. stehen 0.3 % Abnahme pro Jahr einem Jahresgang mit einer Amplitude von 30 % gegenüber, oder Fluktuationen die ebenfalls 30 % von einem Tag auf den anderen betragen können. Zwei Grundvoraussetzungen müssen erfüllt sein, um solche geringen Veränderungen bei so großem natürlichen Rauschen überhaupt nachweisen zu können.

- 1.) Häufige, regelmäßige und langfristige Messungen sind notwendig, um durch statistische Mittelung das natürliche Rauschen weitestgehend zu eliminieren. Dies ist am Hohenpeißenberg durch das intensive langfristige Meßprogramm besser als an den meisten anderen Stationen der Welt erfüllt.
- 2.) Die Genauigkeit der Meßgeräte muß im Bereich von 1 bis 5 % liegen und Stabilität in diesem Bereich muß über Jahre hinweg gewährleistet werden. Neben sorgfältiger Durchführung der Messungen mit geeigneten Geräten, scheint der wiederholte Vergleich verschiedener unabhängiger Meßgeräte die einzige praktikable Methode zu sein, dies sicherzustellen. Auch hier nimmt der Hohenpeißenberg eine Spitzenstellung ein. An keiner anderen Station werden seit Jahren von derselben Gruppe regelmäßig, neben den Gesamt ozonmessungen mit zwei Spektrometern, Lidarmessungen und Ozonsondenaufstiege zur Messung der Vertikalverteilung durchgeführt und vor Ort wissenschaftlich begleitet.

Bild 7 zeigt ein typisches Beispiel für die regelmäßigen Vergleiche zwischen Lidar und Brewer/Mast Sonde am Hohenpeißenberg. Hier ist die Übereinstimmung recht gut, die Maxima bei 14, 18 und 23 km, und die Minima dazwischen werden von beiden Instrumenten nahezu gleich wiedergegeben. Vor allem

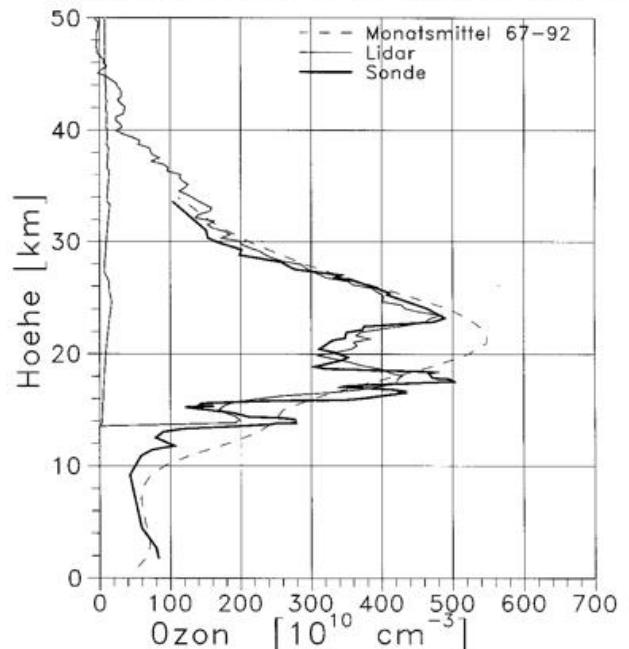


Bild 7: Vergleich des Ozonprofils aus dem Sondenaufstieg vom Morgen des 16. Januar 1995 mit der Lidarmessung der folgenden Nacht.

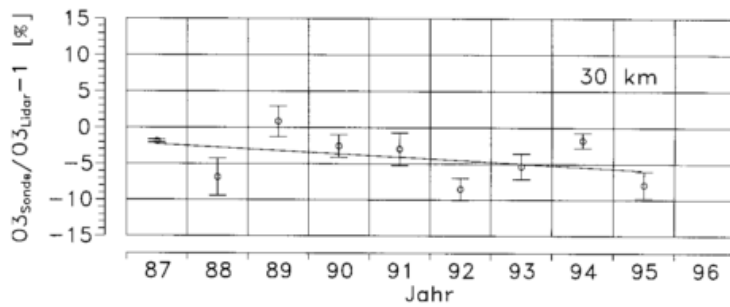


Bild 8: Relativer Unterschied der Ozon-Jahresmittel aus Lidar- und Sondenmessung. Die Fehlerbalken geben die Standardabweichung des Mittelwertes an (1σ). Die durchgezogene Linie ist die nach der Methode der kleinsten Quadrate ermittelte Ausgleichsgerade (Steigung -0.45% pro Jahr, $\pm 0.41\%$ pro Jahr (1σ)).

unterhalb von 22 km, stimmen aber die Sonden- und Lidarmessungen nicht immer so gut überein. Da beide Messungen meistens nicht zeitgleich sind, sind Unterschiede in diesem Höhenbereich oft auf die starken natürlichen Ozonvariationen in der unteren Stratosphäre zurückzuführen. Änderungen von 50 % innerhalb weniger Stunden sind hier keine Seltenheit.

Im Mittel ist die Übereinstimmung zwischen Lidar und Sonde jedoch hervorragend, systematische Unterschiede sind kleiner als 5 %, wobei die Sonde zwischen 70 und 20 hPa (18 bis 27 km) zu geringfügig höheren Werten tendiert. In Höhen oberhalb von 15 hPa (etwa 28 km) liefert die Sonde allerdings zu niedrige Werte (bis zu 20 % bei 6 hPa (32 km)).

Fast wichtiger als die absolute Genauigkeit ist jedoch, daß sich die Unterschiede zwischen Lidar und Sonde mit der Zeit nicht verändert haben. Das könnte nämlich die Frage aufwerfen, ob die gemachten Trendaussagen überhaupt gültig sind. Bild 8 zeigt die zeitliche Entwicklung des Unterschiedes zwischen Lidar und Radiosonde. Dargestellt ist die relative Abweichung des Ozon-Jahresmittels in 30 km Höhe, seit dem Beginn der Lidarmessungen 1987. Man erkennt, daß die Radiosonde im Mittel in 30 km Höhe etwa 4 % niedrigere Ozonwerte anzeigt. Der genaue Wert variiert von Jahr zu Jahr, ohne daß darin ein System zu erkennen wäre. Lineare Ausgleichsrechnung ergibt einen Trend von -0.45% pro Jahr, der aber nicht signifikant von Null verschieden ist. Die Unsicherheit (1σ) ist mit 0.41% pro Jahr praktisch genauso groß wie der Wert selbst.

Ähnliche Ergebnisse werden für die Jahresmittel des Temperaturunterschieds in 30 km Höhe erzielt. Hier liegt die Radiosonde (ohne Strahlungskorrektur) im Mittel um 5.5 K wärmer als das Lidar, wobei alle mittleren Unterschiede innerhalb eines Bereichs von 6 K liegen. Lineare Ausgleichsrechnung ergibt einen Trend von $+0.24\text{ K pro Jahr}$ der ebenfalls nicht signifikant von Null verschieden ist (1σ Unsicherheit $\pm 0.17\text{ K pro Jahr}$).

Ein großer Teil der Schwankungen in Bild 8 erklärt sich wohl daraus, daß beide Messungen in der Regel nicht zeitgleich stattfinden. Die Sonden werden an festen Wochentagen, immer am Morgen gestartet, während die Lidarmessungen unregelmäßig nur in klaren Nächten stattfinden. Selbst wenn man annimmt, daß die beobachteten Unterschiede ausschließlich auf die Instru-

mente zurückzuführen sind, so sollte der instrumentelle Fehler bei Trendaussagen zum Ozon aus den Lidarmessungen und aus den Radiosondenaufstiegen unter 0.5% pro Jahr liegen. Dabei muß betont werden, daß beide Instrumente völlig unabhängig voneinander und nach völlig verschiedenen Meßmethoden arbeiten. Mit noch längeren Meßreihen, z.B. der gesamten 30-jährigen Sondierungsreihe, lassen sich die Unsicherheiten in der Trendaussage deutlich verringern. Voraussetzung dazu ist, daß es gelingt, instrumentelle Drifts klein zu halten. Dies kann ausschließlich durch einen Vergleich wie den in Bild 8 überprüft werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Das Lidar am Hohenpeißenberg ist ein wichtiges Instrument zur Routinemessung des Ozon-, Temperatur- und Aerosolprofils in der Stratosphäre. Es ergänzt in der unteren Stratosphäre die Brewer/Mast Ozonsonde in idealer Weise und trägt dort wesentlich zur Qualitätssicherung der Sondendaten bei. Zusätzlich ermöglicht das Lidar Messungen bis in die Höhe der Stratopause. Beim Ozon ist die Übereinstimmung zwischen Lidar und Sonde sehr gut, besser als 5 %. Bei der Temperatur sind Unterschiede zur Radiosonde vorhanden, deren Ursache nicht geklärt ist. Das Lidar ist eine wichtige Ergänzung zur Ozonsonde, es kann sie aber nicht ersetzen, denn es erlaubt keine Messungen in der untersten Stratosphäre und der gesamten Troposphäre. Außerdem ist es an klare Nächte gebunden, während die Sonden zu beliebiger Zeit eingesetzt werden können.

Die regelmäßigen Messungen mit beiden Instrumenten an derselben Station und die wissenschaftliche Begleitung vor Ort erlauben eine hervorragende Qualitätskontrolle. Dies ist besonders wichtig um instrumentelle Drifts zu erkennen und sicherzustellen, daß beobachtete Trends nicht von einem Instrument vorgetäuscht werden. Die Qualität der Hohenpeißenberger Ozonmeßreihen steht deswegen im internationalen Vergleich mit an der Spitze.

Die Langzeitmessungen mit dem Lidar zeigen eine dramatische Ozonabnahme von über 1 % pro Jahr im Höhenbereich 32 bis 42 km. Diese Abnahme wird höchstwahrscheinlich durch Chlorradikale aus anthropogenen FCKWs verursacht. Damit ist neben der unteren Stratosphäre ein zweiter Höhenbereich identifiziert, in dem deutliche Ozonabnahmen zu verzeichnen sind. Bis jetzt ist noch keine Aussage möglich, inwieweit die mit dem Lidar beobachtete Ozonabnahme Auswirkungen auf die Temperatur zeigt. Nur die Fortsetzung

der Lidarmessungen verspricht neue Erkenntnisse darüber zu bringen. Nicht minder wichtig ist eine Verifizierung, ob sich die Ozonabnahme wie bisher fortsetzt, oder ob die Reduzierung des FCKW-Ausstosses nach dem Montrealer Protokoll Wirkung zeigt. Auch dies macht eine Fortsetzung der kontinuierlichen Lidarmessungen am Hohenpeißenberg erforderlich.

Danksagung

Die lange Lidarmeßreihe am Hohenpeißenberg ist dem Engagement mehrerer Mitarbeiter des MOHP zu verdanken, vor allem W. Vandersee, F. Schönenborn und H. Claude. Neben B. Geh und K.W. Rothe von der Universität München haben A. Stögbauer und Th. Hohmann vom MOHP entscheidend zum Aufbau des Lidars beigetragen. Ihnen allen sei an dieser Stelle gedankt. Projektförderung durch das BMFT hat den Aufbau des Lidars ermöglicht und dem Ozonforschungsprogramm des BMBF verdankt der Autor seinen derzeitigen Arbeitsplatz am MOHP (FKZ 01LO9106/8). Auch dafür sei gedankt.

Literatur

- BRÜHL, C.P.; CRUTZEN, P.J., 1988: Scenarios of Possible Changes in Atmospheric Temperatures and Ozone Concentrations due to Man's Activities, Estimated with a One-Dimensional Coupled Photochemical Model. *Clim. Dynam.*, 2, 173-203.
- CLAUDE, H., GEH, B., HARTMANN GRUBER, R., HOHMANN, T., ROTHE, K.W., SCHÖNENBORN, F., WALTHER, H., WEGE, K., 1989: Weiterentwicklung, Bau und Betrieb eines Lidars zur Bestimmung des atmosphärischen Ozonprofils. Offenbach: Ber. d. Dt. Wetterd. 179, 77 S.
- CLAUDE, H., SCHÖNENBORN, F., STEINBRECHT, W., VANDERSEE, W., 1994: New Evidence for Ozone Depletion in the Upper Stratosphere. *Geophys. Res. Lett.*, 21, 2409-2412. HOLLANDSWORTH ET AL., CLAUDE ET AL., 1996: Comment und Reply. *Geophys. Res. Lett.*, 23, 411-414.
- DÜTSCH, H.U., 1971: Photochemistry of Atmospheric Ozone. *Adv. Geophys.*, 15, 219-322.
- GEH, B., 1987: Aufbau einer automatischen Lidar-Apparatur zur Messung der stratosphärischen Ozonkonzentration. Diplomarbeit, Universität München, 68 S.
- HAUCHECORNE, A., CHANIN, M.L., 1980: Density and Temperature Profiles Obtained by Lidar between 35 and 70 km. *Geophys. Res. Lett.*, 7, 565-568.
- MCDERMID, I.S., 1993: A 4-Year Climatology of Stratospheric Ozone From Lidar Measurements at Table Mountain, 34.4 N. *J. Geophys. Res.*, 98, 10.509-10.515.
- MEASURES, R.M., 1984: *Laser Remote Sensing*. New York: Wiley and Sons, 225 S.
- MEGIE, G., ALLAIN, J.Y., CHANIN, M.L., BLAMONT, J.E., 1977: Vertical Profile of Stratospheric Ozone by Lidar Sounding from the Ground. *Nature*, 270, 329.
- MEGIE, G., ANCELLET, G., PELON, J., 1985: Lidar Measurements of Ozone Vertical Profiles. *Appl. Opt.*, 24, 3454-3463.
- MOLINA, L.T., ROWLAND F.S., 1974: Stratospheric Sink for Chlorofluoromethanes: Chlorine Atom-catalysed Destruction of Ozone. *Nature*, 249, 810-812.
- RUSSELL, P.R., SWISSLER, T.J., MCCORMICK M.P., 1979: Methodology for Error Analysis and Simulation of Lidar Aerosol Measurements. *Appl. Opt.*, 18, 3783-3797.
- UCHINO, O., MAEDA, M., KOHNO, J., SHIBATA, T., NAGASAWA, C., HIRONO, M., 1978: Observation of Stratospheric Ozone Layer by XeCl Laser Radar. *Appl. Phys. Lett.*, 33, 807-809.
- WARNECK, P., 1988: *Chemistry of the Natural Atmosphere*. San Diego: Academic Press, 753 S.
- WERNER, J., ROTHE, K.W., WALTHER, H., 1983: Monitoring of the Stratospheric Ozone Layer by Laser Radar. *Appl. Phys.*, B 32, 113-118.
- WMO, 1989: *Scientific Assessment of Stratospheric Ozone: 1989*. Genf: WMO, GO3OS Rep. 20, 2 Bände, 486+469 S.

Vorausschau – Tagungen

- INM/WMO International Symposium on Cyclones and Hazardous Weather in the Mediterranean. 14.–17. April 1997, Palma de Mallorca. Informationen: Centro Met. de Baleares, Muelle de Poniente s/n (Portopi), E-07071 Palma de Mallorca, Spain.
- Geotechnica. International Trade Fair and Congress for the Geosciences and Geotechnology. Applied Earth Sciences. 13.–16. Mai 1997, Köln. Informationen: Köln Messe Press Office, PF 210760, 50532 Köln.
- 3rd European Conference on Applications of Meteorology. 23.–26. Sept. 1997, Lindau. Informationen: Organizing Committee, ECAM-97, Deutscher Wetterdienst, Frankfurter Str. 135, 63067 Offenbach a. M.
- The 1997 METEOSAT Meteorological Satellite Data Users' Conference. 29.9.–3.10.1997, Brüssel. Informationen: EUMETSAT, Fr. M. Pooley, Am Kavalleriesand, 64295 Darmstadt.
4. Deutsche Klimatagung. 1.–3. Okt. 1997, Frankfurt a. M. Informationen: Prof. Dr. Chr.-D. Schönwiese, Inst. f. Meteorologie u. Geophysik, PF 111932, 60054 Frankfurt a.M.
- Head Water '98. International Interdisciplinary Conference. Water Resources and Ecology in Headwaters. 20.–23. April 1998, Meran. Informationen: European Academy, Weggensteinstr. 12/A, I-39100 Bozen.
- International Symposium on Hydrology in a Changing Environment. 6.–10. Juli 1998, Exeter. Informationen: Dr. B. Webb, Department of Geography, Amory Building, Rennes Drive, Exeter, Devon, EX4 4RJ, UK.

Anschriften der Autoren (Thema des Heftes)

Dipl.-Met. Hans-Jürgen CLAUDE
Dipl.-Met. Ulf KÖHLER
Dr. Wolfgang STEINBRECHT
Dr. Klaus WEGE
Dr. Peter WINKLER
Deutscher Wetterdienst
Meteorologisches Observatorium
Hohenpeißenberg
Albin-Schwaiger-Weg 10
82383 Hohenpeißenberg

Angebot

Vollständige Reihe der Zeitschrift PROMET
1971–1974 kostenlos gegen Übernahme der
Transportkosten abzugeben.

Tel.: 0 69/80 62 22 72, Fax: 0 69/ 80 62 24 86

Kirch