



**Berichte des Deutschen Wetterdienstes**

**179**

**Weiterentwicklung, Bau und Betrieb eines Lidars zur  
Bestimmung des atmosphärischen Ozonprofils**

von  
Hans Claude u.a.



Zitationsvorschlag:

Claude, Hans u.a.: Weiterentwicklung, Bau und Betrieb eines Lidars zur Bestimmung des atmosphärischen Ozonprofils. - Offenbach am Main: Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, 1989.  
(Berichte des Deutschen Wetterdienstes ; 179)

ISSN der Onlineausgabe: 2194-5969

ISSN der Druckausgabe: 0072-4130

---

## Nutzungsbedingungen



Dieses Dokument steht unter folgender Creative Commons-Lizenz

Sie dürfen das Werk bzw. den Inhalt unter folgenden Bedingungen vervielfältigen, verbreiten und öffentlich zugänglich machen: Sie müssen den Namen des Autors/Rechteinhabers in der von ihm festgelegten Weise nennen. Dieses Werk bzw. dieser Inhalt darf nicht für kommerzielle Zwecke verwendet werden und es darf nicht bearbeitet, abgewandelt oder in anderer Weise verändert werden.

Mit der Verwendung dieses Dokumentes erkennen Sie die Nutzungsbedingungen an.

---

Herausgeber und Verlag: :

Deutscher Wetterdienst  
Frankfurter Straße 135  
D- 63067 Offenbach am Main

Internet: [www.dwd.de](http://www.dwd.de)  
Mail: [bibliothek@dwd.de](mailto:bibliothek@dwd.de)

| <b>Inhalt</b>                   |                                       | <b>Seite</b> |
|---------------------------------|---------------------------------------|--------------|
| <b>Zusammenfassung/Abstract</b> |                                       | 5            |
| <b>1</b>                        | <b>Einleitung</b>                     | 7            |
| <b>2</b>                        | <b>Grundlagen des Meßverfahrens</b>   | 9            |
| <b>3</b>                        | <b>Beschreibung der Apparatur</b>     | 16           |
| 3.1                             | Aussendeteil                          | 18           |
| 3.1.1                           | Ramanzelle                            | 19           |
| 3.1.2                           | Aufweitungsoptik                      | 19           |
| 3.2                             | Empfangssystem                        | 22           |
| 3.3                             | Nachweiselektronik                    | 25           |
| <b>4</b>                        | <b>Software und Automation</b>        | 28           |
| 4.1                             | Allgemeines                           | 28           |
| 4.2                             | Die Systemdateien                     | 29           |
| 4.3                             | Die dynamische Organisation           | 29           |
| 4.4                             | Automation und Überwachung            | 30           |
| 4.4.1                           | Initialisierung                       | 30           |
| 4.4.2                           | Untere/obere Messung                  | 30           |
| 4.4.3                           | Reguläres Ende der Messung            | 31           |
| 4.4.4                           | Vorzeitiges Ende der Messung          | 31           |
| 4.4.4.1                         | Systemverhalten bei Wolkenaufzug      | 31           |
| 4.4.4.2                         | Notabschaltung                        | 31           |
| 4.4.4.3                         | Rechnerausfall                        | 32           |
| 4.5                             | Prüfung der Meßdaten                  | 32           |
| 4.6                             | Erfahrungen und Ausblicke             | 32           |
| <b>5</b>                        | <b>Besondere Probleme</b>             | 34           |
| 5.1                             | Laser                                 | 34           |
| 5.2                             | Spiegelverschmutzung                  | 34           |
| 5.3                             | Synchronisationsfehler                | 35           |
| 5.4                             | Photomultiplierprobleme               | 36           |
| 5.5                             | Austausch eines Interferenzfilters    | 38           |
| <b>6</b>                        | <b>Auswertung</b>                     | 39           |
| 6.1                             | Aerosole und Aerosolkorrektur         | 41           |
| 6.2                             | Glättungsprozeduren und Ortsauflösung | 45           |
| 6.3                             | Fehler der Ozonkonzentration          | 48           |
| <b>7</b>                        | <b>Ergebnisse</b>                     | 49           |
| 7.1                             | Test- und Erprobungsphase             | 49           |
| 7.2                             | Vergleich Lidar - Spektrophotometer   | 56           |
| 7.3                             | Vergleich Lidar - Brewer/Mast-Sonde   | 57           |
| 7.4                             | Lang- und kurzfristige Ozonänderungen | 63           |
| <b>8</b>                        | <b>Literatur</b>                      | 73           |
| <b>9</b>                        | <b>Danksagung</b>                     | 77           |



## **Zusammenfassung**

Am Meteorologischen Observatorium Hohenpeißenberg wurde in Zusammenarbeit mit der Sektion Physik der Universität München und dem Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching ein Ozonlidar installiert, das Messungen bis 50 km Höhe gestattet: Es reicht daher über die Gipfelhöhen von Sonden (30 - 35 km) hinaus und erfaßt einen Höhenbereich, in dem nach Modellrechnungen ein besonders starker Ozonrückgang prognostiziert wird.

Das Meßverfahren sowie der Aufbau der Lidaranlage mit ihrem Aussende- und Empfangssystem werden ausführlich beschrieben. Es folgt ein Überblick über die umfangreiche Nachweis- und Steuer-elektronik sowie über die Softwareentwicklung der Meßdatenerfassung- und Auswerteprogramme. Auch auf die Automation der Anlage wird eingegangen. Schließlich werden die seit mehr als einem Jahr vorliegenden Ergebnisse der Lidarmessungen präsentiert, vorzugsweise im Vergleich mit den Daten der Ozonsondierungen und Messungen mit Spektrophotometern. Es sind gute Übereinstimmungen zwischen den verschiedenen Meßsystemen vorhanden. Darüber hinaus werden Ozonphänomene diskutiert, die mit herkömmlichen Techniken nicht erfaßbar sind.

## **Abstract**

In co-operation with the "Sektion Physik der Universität München" and the "Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Garching" a lidar system has been installed at the Hohenpeißenberg observatory allowing measurements of the vertical ozone distribution up to 50 km altitude. By this means domains of the upper stratosphere can be observed where a strong depletion is predicted by model calculations and which cannot be reached by regular ozone soundings.

A detailed description of the system functions and set-up is followed by a survey of the electronics and computer programs.

Information about the system automation is also provided. Finally the results of one year of operation are presented with a focus on the intercomparison between lidar, balloon sondes and spectrophotometers. A very high agreement between all these systems can be observed. Some ozone phenomena detectable only with this novel technique are discussed.

## 1 Einleitung

Am Meteorologischen Observatorium Hohenpeißenberg wird seit mehr als 20 Jahren ein kontinuierliches Ozonmeßprogramm durchgeführt. Diese Messungen hatten anfangs ausschließlich die Erforschung der meteorologischen Vorgänge in der Stratosphäre als Ziel. Die Erkenntnis, daß Ozon eine zentrale Rolle im atmosphärischen Spurenstoff- und Strahlungshaushalt spielt, lag noch nicht vor. Auch die Möglichkeit, das atmosphärische Ozon durch menschliche Aktivitäten derart zu beeinflussen, daß atmosphärische Gleichgewichtszustände verändert werden, wurde noch nicht in Betracht gezogen. Dennoch war das Interesse an diesem Spurengas groß genug, um ein europäisches Ozonsondierungsnetz ins Leben zu rufen (DÜTSCH 1986). Die in diesem Netz eingesetzten ballongetragenen Sonden erreichen Höhen von 30 - 35 km. Mittlerweile werden diese Aufstiege weltweit an nahezu 20 Stationen etwa 1- bis 3mal pro Woche durchgeführt. Um auch Ozondaten aus größeren Höhen zu erhalten, wurden sporadisch Raketensonden gestartet (KRUEGER 1987). Auch von Satelliten aus wird Ozon gemessen. Die Lebensdauer dieser Beobachtungsplattformen beträgt jeweils einige Jahre. Eine regelmäßige Überwachung ermöglichen die Dobson- oder Brewer-Spektrophotometer, die jedoch - wenn man einmal von den schwierigen Umkehrmessungen absieht - nur den Gesamtozonwert messen.

Seitdem bekannt ist, daß Ozon eine dominierende Rolle im atmosphärischen Spurenstoff- und Strahlungshaushalt spielt und dieses Spurengas außerdem in erheblichem Maß anthropogen beeinflusst wird, sind intensivierete Forschungsanstrengungen notwendig geworden. Hierzu gehört vor allem die Messung in dem bisher nur schwer zugänglichen Bereich oberhalb 35 km, da hier mit dem verhältnismäßig stärksten Ozonabbau durch FCKW gerechnet wird (WUEBBELS, LUTHER, PENNER 1983, BRASSEUR und DeRUDDER 1987, BRASSEUR und SIMON 1988). Erster gemessener Hinweis für diese These kann die signifikante Ozonabnahme im oberen Meßbereich (30 - 35 km) der Hohenpeißenberger Sondierungen in den letzten

elf Jahren sein (WEGE, CLAUDE, HARTMANNSGRUBER 1988). Darüber sind entsprechende Trends bisher nicht verifizierbar.

Operationelle Messungen in der oberen Stratosphäre wurden erst durch die Lidartechnik möglich. Die ersten vielversprechenden Lidarmessungen fanden Anfang der achtziger Jahre statt und reichten bereits bis in die mittlere Stratosphäre (UCHINO et al. 1980, PELON und MEGIE 1982).

Von der Sektion Physik der Universität München und dem Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Garching, wurde ein System entwickelt, bei dem erstmals die stimulierte Ramanstreuung zur Erzeugung der Referenzwellenlänge angewendet wurde (WERNER ROTHE, WALTHER 1983 a). Dies hat den Vorteil einer einfacheren Geräteanordnung. Außerdem werden beide Wellenlängen gleichzeitig und deckungsgleich ausgesandt (WERNER, ROTHE, WALTHER 1983 b, WERNER 1984). Das System wurde ab Oktober 1983 auf der Zugspitze eingesetzt und hat hochgenaue Ozonprofile bis in etwa 50 km Höhe gemessen (WERNER, ROTHE, WALTHER 1985). Dieses Lidar schien damit für den operationellen Betrieb am Hohenpeißenberg sehr gut geeignet zu sein. Neben dem Ziel, das Verhalten des Ozons in der oberen Stratosphäre zu erforschen, boten sich am Hohenpeißenberg zusätzlich ideale Vergleichsmöglichkeiten zu den konventionellen Meßsystemen an.

In Zusammenarbeit mit den oben angesprochenen Instituten und unter Förderung durch den BMFT wurde am Observatorium eine neue Lidaranlage errichtet, die von den Erfahrungen des Zugspitzlidars wesentlich profitierte und gegenüber diesem einige Verbesserungen aufweist (GEH 1987).

## 2 Grundlagen des Meßverfahrens

Bei einem Ozon-Lidar werden UV-Lichtimpulse senkrecht in die Atmosphäre emittiert und die infolge Rayleigh- und Miestreuung rückgestreuten Photonen über ein Spiegelteleskop empfangen und nachfolgend ausgewertet. Diese Auswertung führt zur Bestimmung des vertikalen Ozonprofils. Die Methode wurde mehr oder weniger ausführlich von WERNER et al. (1983 a, 1983 b, 1985), WERNER (1984), GEH (1987), WEGE und CLAUDE (1988) beschrieben.

Sendet man einen Lichtpuls aus, dessen Länge klein ist gegenüber der angestrebten Ortsauflösung, so erhält man die Zahl der Photonen, die von der Schichtdicke  $\Delta R$  der Entfernung  $R$  zurückgestreut werden, über die sogenannte Lidargleichung:

$$M(R,\lambda) = M_0(\lambda) \cdot E(\lambda) \cdot \frac{F}{R^2} \cdot \Delta R \cdot \beta(R,\lambda) \cdot T^2(0,R,\lambda) \quad (2.1)$$

Wobei

$M(R,\lambda)$  = Zahl der empfangenen Photonen aus der Schichtdicke  $\Delta R$  in der mittleren Entfernung  $R$  für die Wellenlänge  $\lambda$

$M_0(\lambda)$  = Vom Sendesystem emittierte Photonenzahl der Wellenlänge  $\lambda$

$E(\lambda)$  = Effizienz des Nachweissystems

$F$  = Fläche des Empfangsspiegels

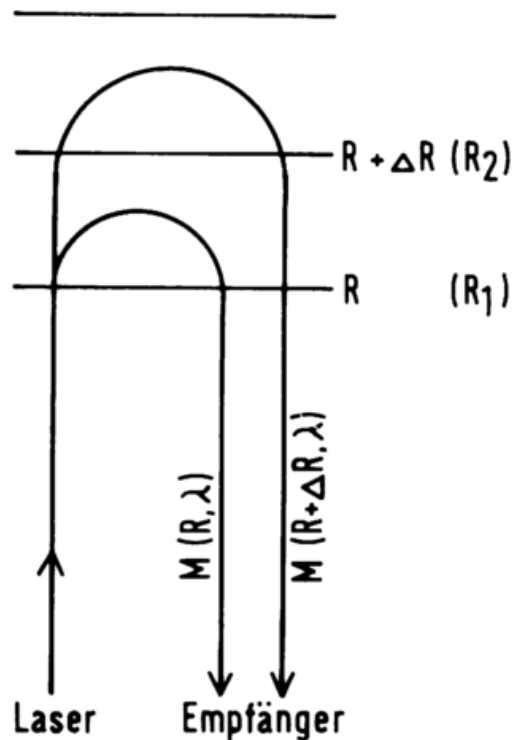
$\beta(R,\lambda)$  = Rückstreuoeffizient

$T(0,R,\lambda)$  = Transmission der Atmosphäre vom Boden bis zur Entfernung  $R$

Die Transmission  $T$  ist quadratisch enthalten, weil das Licht die Strecke Gerät - Höhe  $R$  zweimal durchläuft.

Betrachtet man die Lidargleichung (2.1), so fallen einige grundsätzliche Probleme ins Auge: Die Sendeenergie ist exakt nicht bekannt und ändert sich laufend, die Effizienz des Nachweissystems bleibt nicht konstant, die Transmission der Atmosphäre bis zum Zielpunkt ist kaum zu bestimmen (Aerosolverteilung unbekannt) und ändert sich kurzzeitig.

Man betrachtet daher zwei aufeinanderfolgende Schichten der Schichtdicke  $\Delta R$  und bildet den Quotienten aus deren Rückstreusignalen (Abb. 1).



**Abbildung 1:** Rückstreusignale  $M$  aus den Höhen  $R$  und  $(R + \Delta R)$ .

Aus Gleichung (2.1) ergibt sich dann:

$$q = \frac{M(R_2, \lambda)}{M(R_1, \lambda)} = \frac{\beta(R_2, \lambda) \cdot R_1^2}{\beta(R_1, \lambda) \cdot R_2^2} \cdot T^2(R_1, R_2, \lambda) \quad (2.2)$$

Auf diese Weise werden Geräteeigenschaften (Sendeenergie, Fläche des Empfangsspiegels, Effizienz des Nachweissystems) eliminiert und die Transmission auf den Bereich  $R_1, R_2$  beschränkt. Da beide Signale, aus dem unteren und dem oberen Bereich, zum praktisch gleichen Zeitpunkt die Atmosphäre unterhalb  $R_1$  durchlaufen, erfahren sie auch die gleiche Schwächung zwischen Gerät und  $R_1$ . Es gehen nur noch das Streu- und Extinktionsverhalten der Atmosphäre in den betrachteten beiden Höhenschichten ein.

Prinzipiell wäre die Bestimmung des vertikalen Ozonprofils bereits auf diese Weise möglich, wobei eine Wellenlänge verwendet werden muß, die Ozon möglichst stark absorbiert. Dies wurde auch von UCHINO, MAEDA und HIRONO (1979) versucht. Bei Kenntnis der vertikalen Druck- und Temperaturverteilung kann die Rayleighstreuung entsprechend berücksichtigt werden, die Aerosole bringen jedoch so erhebliche Fehler, daß eine solche Messung nicht zuverlässig ist.

Daher wird eine zusätzliche Messung mit einer zweiten Wellenlänge durchgeführt, bei der im Gegensatz zur ersten Wellenlänge die Absorption durch Ozon möglichst gering ist (sogenannte Referenzwellenlänge). Hierdurch wird der Einfluß der Streumediten erheblich reduziert. Die Erzeugung dieser Referenzwellenlänge durch stimulierte Ramanstreuung wurde erstmals bei dem Zugspitzlidar von WERNER et al. (1983 a, 1983 b, 1985), WERNER (1984) eingeführt. Diese Methode hat u. a. den Vorteil, daß beide Wellenlängen gleichzeitig und in den gleichen Raumwinkel abgestrahlt werden.

Bildet man für die Referenzwellenlänge  $\lambda_2$  das gleiche Verhältnis  $q(\lambda_2)$  entsprechend Gleichung (2.2) und bildet wiederum das Verhältnis beider Gleichungen, so erhält man (1. Index = Höhe, 2. Index = Wellenlänge):

$$q = \frac{q(\lambda_1)}{q(\lambda_2)} = \frac{M_{21} \cdot M_{12}}{M_{11} \cdot M_{22}} = \frac{\beta_{21} \cdot \beta_{12}}{\beta_{11} \cdot \beta_{22}} \cdot \frac{T^2(R_1, R_2, \lambda_1)}{T^2(R_1, R_2, \lambda_2)} \quad (2.3)$$

Zur weiteren Behandlung ist das Beer-Lambertsche Gesetz anzuwenden:

$$T^2 = \exp \left( - 2 \int_{R_1}^{R_2} \alpha(r, \lambda) dr \right) \quad (2.4)$$

wobei  $\alpha(r, \lambda)$  der Extinktionskoeffizient ist.

Die Extinktion setzt sich zusammen aus einem Anteil infolge der Rayleighstreuung  $\alpha_R$ , der Miestreuung  $\alpha_M$  und der Absorption  $\alpha_A$ :

$$\alpha(\lambda) = \alpha_R(\lambda) + \alpha_M(\lambda) + \alpha_A(\lambda) \quad (2.5)$$

Der Absorptionskoeffizient  $\alpha_A$  ergibt sich aus der Teilchendichte  $N_A$  der abschwächenden Substanz und dem Wirkungsquerschnitt  $\sigma_A$ :

$$\alpha_A(\lambda) = N_A \cdot \sigma_A(\lambda) \quad (2.6)$$

$\alpha_A$  ist außerdem temperaturabhängig.

Auf diese Weise wird die interessierende Größe, nämlich die Teilchendichte  $N_A$  des Ozons, eingeführt. Weiter gilt:

$$\alpha_R(\lambda) = N_R \cdot \sigma_R(\lambda)$$

$$\alpha_M(\lambda) = N_M \cdot \sigma_M(\lambda)$$

Auch der Rückstreuoeffizient  $\beta(\lambda)$  läßt sich in die Anteile für Rayleigh- und Miestreuung aufteilen:

$$\beta(\lambda) = \beta_R(\lambda) + \beta_M(\lambda) \quad (2.7)$$

Gleichungen (2.4, 2.5, 2.6) in (2.3) eingesetzt ergibt:

$$\frac{M_{21} \cdot M_{12}}{M_{11} \cdot M_{22}} = \frac{\beta_{21} \cdot \beta_{12}}{\beta_{11} \cdot \beta_{22}} \cdot \frac{\exp \left[ - 2 (N_R \sigma_R(\lambda_1) + N_M \sigma_M(\lambda_1) + N_A \sigma_A(\lambda_1)) \Delta R \right]}{\exp \left[ - 2 (N_R \sigma_R(\lambda_2) + N_M \sigma_M(\lambda_2) + N_A \sigma_A(\lambda_2)) \Delta R \right]}$$

und schließlich mit  $\sigma_R(\lambda_1) - \sigma_R(\lambda_2) = \Delta\sigma_R$  ( $\Delta\sigma_M$  und  $\Delta\sigma_A$  entsprechend):

$$\frac{M_{21} \cdot M_{12}}{M_{11} \cdot M_{22}} = \frac{\beta_{21} \cdot \beta_{12}}{\beta_{11} \cdot \beta_{22}} \cdot \exp(-2 \Delta R (N_R \Delta\sigma_R + N_M \Delta\sigma_M + N_A \Delta\sigma_A)) \quad (2.8)$$

Jetzt zeigt sich der große Vorteil der Verwendung zweier Wellenlängen: Statt der Absolutwerte der Wirkungsquerschnitte gehen nur noch deren Differenzen, abhängig von den gewählten Wellenlängen  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$ , ein. Beide Wellenlängen müssen so gewählt werden, daß die Differenz der Ozonabsorptionswirkungsquerschnitte möglichst groß, die für Rayleigh- und Miestreueung möglichst klein sind:

$$\Delta\sigma_A = \sigma_A(\lambda_1) - \sigma_A(\lambda_2) \approx \sigma_A(\lambda_1) \quad (2.9)$$

$$\Delta\sigma_R = \sigma_R(\lambda_1) - \sigma_R(\lambda_2) \ll \sigma_R(\lambda_1) \quad (2.10)$$

$$\Delta\sigma_M = \sigma_M(\lambda_1) - \sigma_M(\lambda_2) \ll \sigma_M(\lambda_1) \quad (2.11)$$

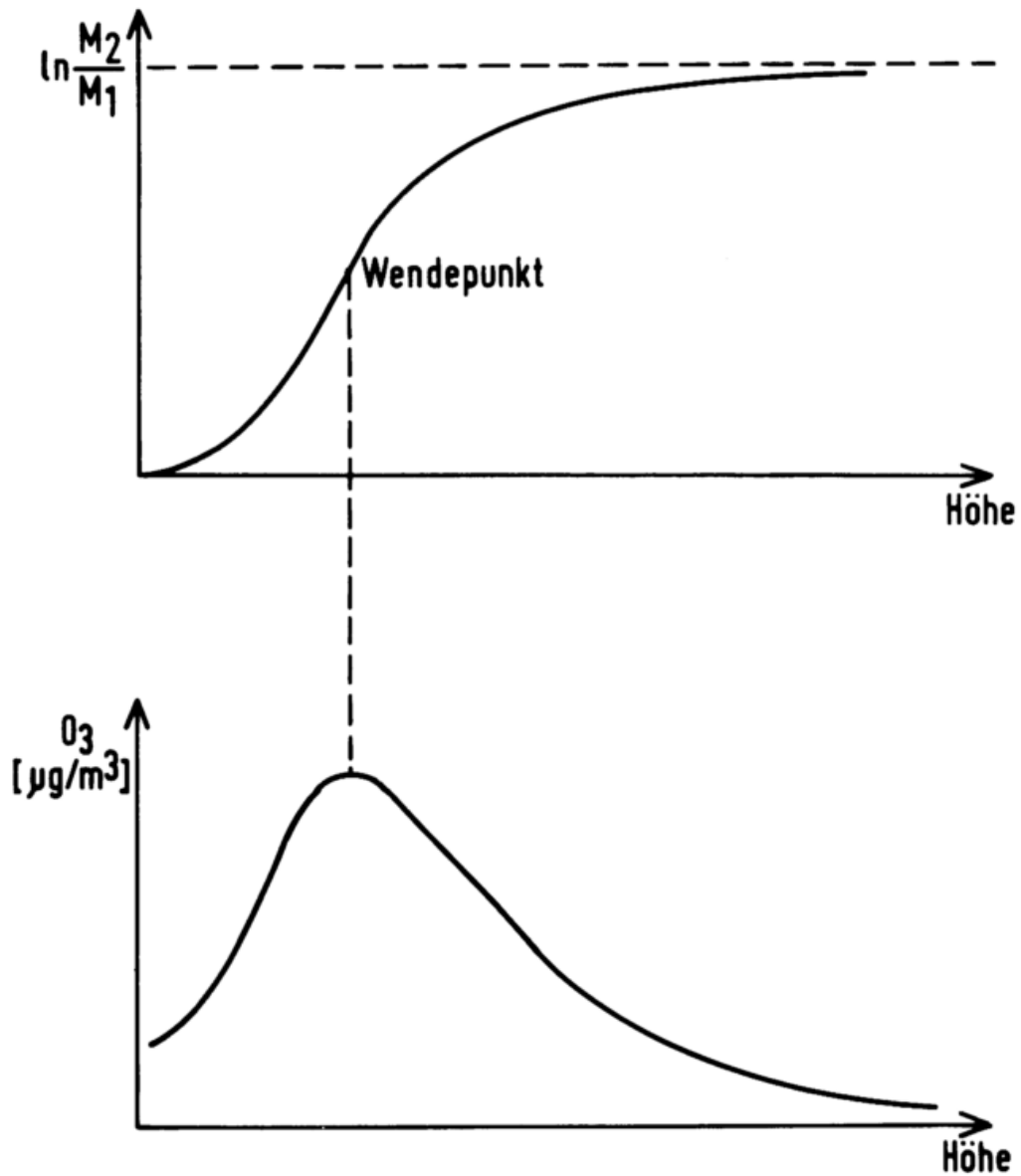
Die interessierende Größe in Gleichung (2.8) ist die Ozonteildichte  $N_A$ , nach der aufzulösen ist. Hierzu ist die Gleichung zu logarithmieren, man erhält schließlich:

$$N_A(R_{1/2}) = \frac{1}{2\Delta R \Delta\sigma_A} \ln \frac{M_{11} \cdot M_{22}}{M_{21} \cdot M_{12}} + \frac{1}{2\Delta R \Delta\sigma_A} \ln \frac{\beta_{21} \cdot \beta_{12}}{\beta_{11} \cdot \beta_{22}} - \frac{1}{\Delta\sigma_A} (N_R(R_{1/2}) \Delta\sigma_R + N_M(R_{1/2}) \Delta\sigma_M) \quad (2.12)$$

oder

$$N_A(R_{1/2}) = \frac{1}{2\Delta\sigma_A} \cdot \frac{\ln \frac{M_{22}}{M_{21}} - \ln \frac{M_{12}}{M_{11}}}{\Delta R} + S(R_{1/2}) - E(R_{1/2}) \quad (2.13)$$

Das erste Glied von (2.12) bzw. (2.13) ergibt die eigentliche Auswertung, in ihm sind die 4 Meßgrößen, nämlich die Zahl der rückgestreuten Photonen ( $M_{11}$ ,  $M_{12}$ ,  $M_{21}$ ,  $M_{22}$ ) aus der unteren und oberen Schicht für Absorptions- und Referenzwellenlänge enthalten. Stellt man das logarithmische Verhältnis der Rück-



**Abbildung 2:** Schematisches vertikales Profil der Größe  $\ln \frac{M_2}{M_1}$  (oben) und der Ozonkonzentration (unten).

streusignale für Referenz- und Absorptionswellenlänge mit der Höhe dar, so ergibt die Ableitung dieser Kurve das vertikale Ozonprofil (siehe Abb. 2). In der Höhe des Ozonmaximums hat die obere Kurve einen Wendepunkt.

Gleichung (2.13) zeigt dies in Differenzenform, in Differentialform lautet (2.13)

$$N_A(R) = \frac{1}{2\Delta\sigma_A} \frac{\partial}{\partial R} \ln \frac{M_2(R)}{M_1(R)} + S(R) - E(R)$$

Das Verfahren stellt erhebliche Anforderungen an die Messung, da eine Differentiation (sie ist numerisch anzunähern) zur gesuchten Größe, nämlich der Ozonkonzentration, führt. Außerdem sind die Rückstreusignale sehr schwach. Im Mittel wird aus 50 km Höhe pro Schicht (300 m) und 50 Schuß nur 1 rückgestreutes Photon empfangen.

Das 2. und 3. Glied in (2.12) bzw. (2.13) sind Korrekturglieder, die sich aufgrund der wellenlängenabhängigen Streuprozesse ( $S(R)$ ) und der Wellenlängenabhängigkeit der Extinktion durch Rayleigh- und Miestreuung ( $E(R)$ ) ergeben. Aus diesen Gliedern ergibt sich, was bereits oben gezeigt wurde, daß die Differenz  $\Delta\sigma_A$  der Absorptionswirkungsquerschnitte möglichst groß, während die Differenzen der Wirkungsquerschnitte für Rayleigh- und Miestreuung ( $\Delta\sigma_R$ ,  $\Delta\sigma_M$ ) möglichst klein sein sollten. Mit anderen Worten: Die verwendeten Wellenlängen sollen innerhalb bzw. außerhalb einer Ozonabsorptionsbande, dabei jedoch möglichst dicht beieinander liegen.

Das Lidar-System verwendet einen XeCl-Excimer-Laser, der bei 308 nm emittiert, eine Wellenlänge, die auf der Flanke der Hartley-Huggins-Bande liegt und von Ozon stark absorbiert wird. Die Referenzwellenlänge wird durch stimulierte Ramanstreuung an Wasserstoff in der ersten Stokeslinie erzeugt, sie liegt bei 353 nm. Der Absorptionswirkungsquerschnitt ist hier um ca. 3 Größenordnungen geringer, die Forderung großes  $\Delta\sigma_A$  ist also gut erfüllt. Die 2. Forderung, kleines  $\Delta\sigma_R$  und  $\Delta\sigma_M$ , ist wegen des doch etwas größeren Wellenlängenabstands nicht so gut erfüllt, die Korrekturglieder sind nicht ganz zu vernachlässigen.

### 3 Beschreibung der Apparatur

Abbildung 3 zeigt den schematischen Aufbau des Systems. Kernstück der Anlage ist ein gepulster XeCl-Excimerlaser der Firma Lambda Physik (EMG 201). Dieser ist mit einem instabilen Resonator ausgestattet und liefert, bei einer maximalen Repetitionsrate von 25 Hz, Pulse von 30 ns Länge. Die Pulsenergie beträgt 280 mJ und kann während des Betriebs von einer "Intelligent-Laser-Control"-Einheit (ILC) kontrolliert und stabilisiert werden. Die ILC bietet zudem die Möglichkeit für einen Rechneranschluß, so daß im Verlauf der Messung Laserparameter wie Hochspannung, Gasdruck und Pulsenergie auch rechnerseitig überprüft bzw. verändert werden können. Im Einsatz zeigte sich allerdings, daß eine aktive Stabilisierung der Pulsenergie aufgrund der guten Dauerbetriebseigenschaften dieses Lasers nie nötig wurde (mehr als  $10^6$  Pulse können emittiert werden, bevor die Energie auf 50 % der Anfangsenergie absinkt).

Nach Verlassen des Lasers wird das Licht über einen Umlenkspiegel in eine mit Wasserstoff gefüllte Zelle fokussiert (Ramanzelle). Dadurch wird die Referenzstrahlung (1. Stokeslinie) simultan und kollinear erzeugt. Nach Verlassen der Ramanzelle werden die beiden Strahlen über einen Umlenkspiegel und eine Aufweitungsoptik senkrecht in die Atmosphäre emittiert.

Das rückgestreute Licht wird über einen Konkavspiegel und einen Faltspiegel auf die Gesichtsfeldblende des Nachweissystems gelenkt. Das Nachweissystem selbst ist in einem massiven, aus einem Stück gefrästen Aluminiumblock (Detektorblock) untergebracht. Im Detektorblock werden die beiden Wellenlängen separiert und nach Durchgang durch schmalbandige Interferenzfilter zwei rauscharmen Photomultipliern zugeführt.

Die Rückstreuozählraten der beiden Wellenlängen werden zunächst in schnellen digitalen Transientenrekordern (Le Croy) zwischengespeichert. Die Kanalstandzeit beträgt 2  $\mu$ s, was einer Höhen-

auflösung von 300 m entspricht, die damit groß gegen die räumliche Ausdehnung des Laserpulses ist. Der Rechner liest die Zwischenspeicher alle 32 Laserpulse aus und speichert die Daten auf Festplatte. Auf Wunsch können die Rückstreusignale auf einem Bildschirm angezeigt werden.

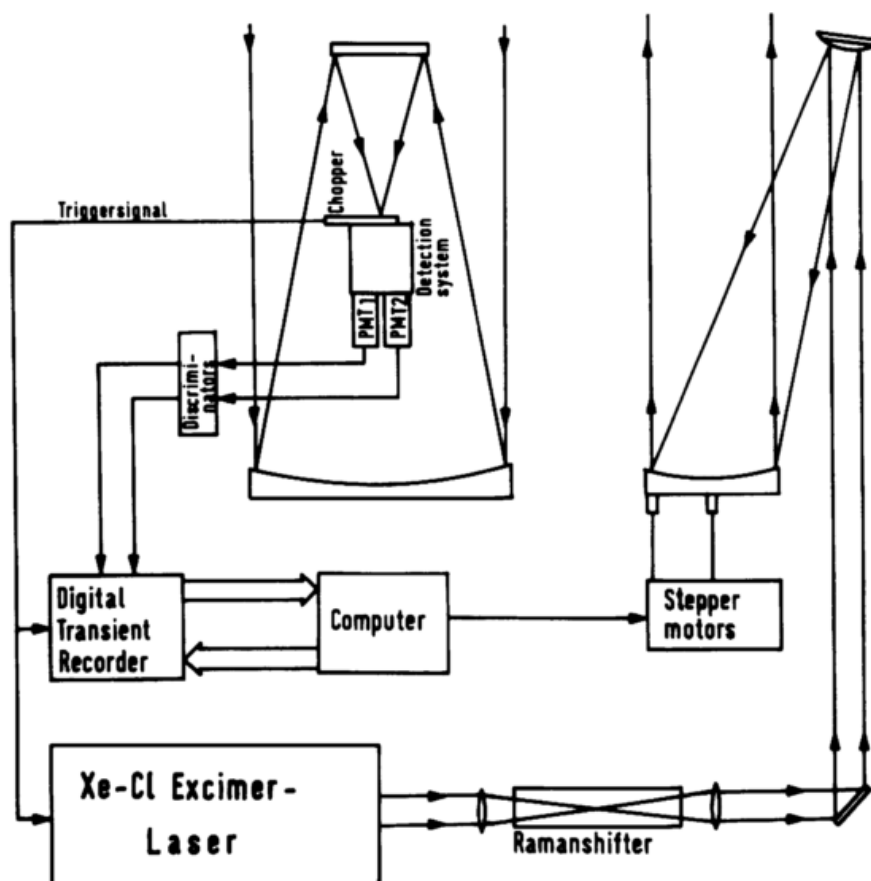


Abbildung 3: Übersichtsdiagramm der Lidarapparatur.

Aufgrund der außerordentlich hohen Dynamik des Rückstreusignals würden die Photomultiplier vom Streulicht aus geringen Höhen übersteuert werden. Um dies zu vermeiden, ist am Detektoreintritt eine schnelldrehende Chopperscheibe angebracht, die den Strahlengang bei jedem Laserschuss kurzzeitig abdeckt. Von diesem Chopper wird über eine Lichtschranke ein Triggersignal abgegriffen, das den Zündzeitpunkt des Lasers und den Beginn der Signalaufnahme definiert.

Um auch das Rückstreuungssignal aus geringen Höhen nutzen zu können, ist es möglich, rechnergesteuert einen Abschwächer in den Strahlengang einzufügen. Aussendeoptik und Empfangsoptik grenzen genügend nahe aneinander, um bereits nach wenigen Kilometern einen vollständigen Überlapp zwischen Laserstrahl und Gesichtsfeld des Empfängers zu gewährleisten.

Die gesamte Anlage steht auf einer massiven, eigens für diesen Zweck gegossenen Stahlbetonplatte, um eine gute Stabilität der Justierung zu bewahren.

### 3.1 Aussendeteil

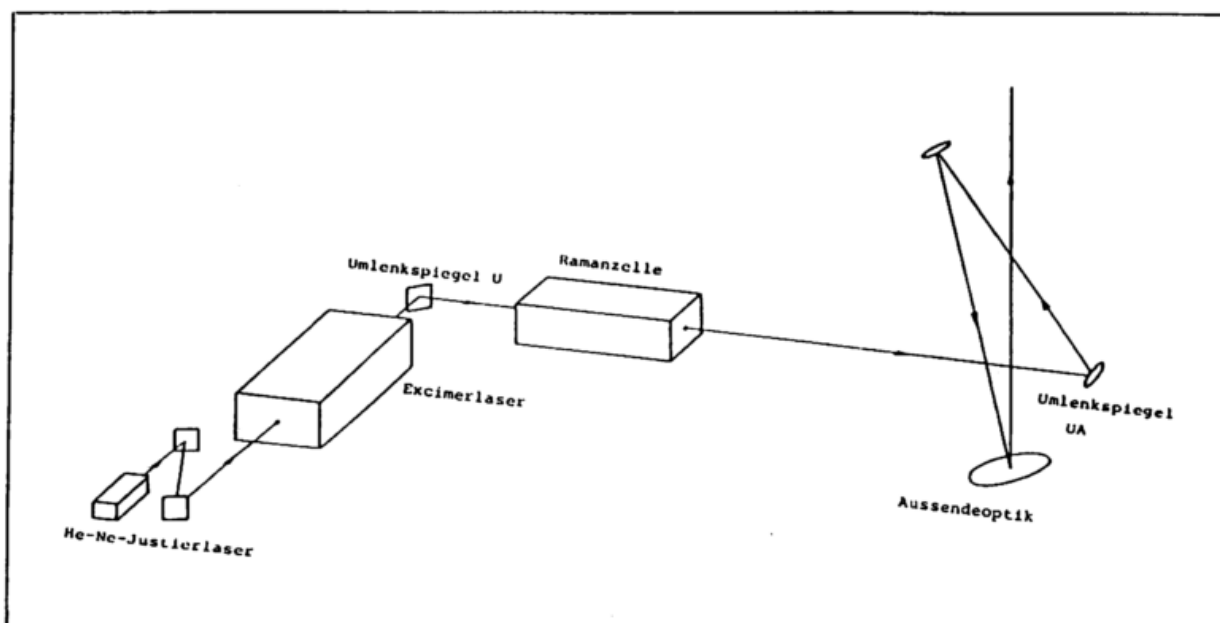


Abbildung 4: Schemazeichnung des Aussendesystems.

Neben dem eingangs beschriebenen Laser besteht der Aussendeteil aus der Ramanzelle und der Aufweitungsoptik (Abb. 4).

### 3.1.1 Ramanzelle

Die Ramanzelle ist ein modifizierter kommerzieller "raman-shifter" der Firma Lambda Physik, die an beiden Enden durch entspiegelte Suprasil-Planparallelplatten abgeschlossen ist. Am Strahleintritt vor dem Fenster befindet sich eine Bestformlinse aus Suprasil ( $f = 620 \text{ mm}$ ), die den Laserstrahl in die Druckzelle fokussiert. Am Strahlaustritt befindet sich ein UV-Achromat ( $f = 400 \text{ mm}$ ), der in seiner Position axial verschoben werden kann, um ein paralleles Austreten der Strahlen (Laserlinie und Stokeslinie) zu gewährleisten. Der Gasdruck in der Zelle kann an einem eingebauten Manometer abgelesen werden.

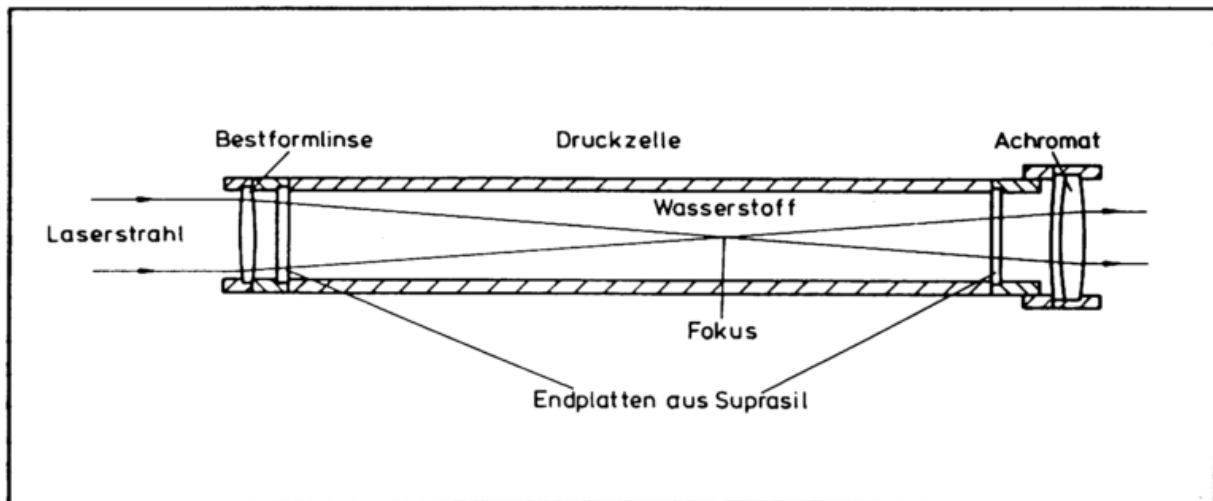
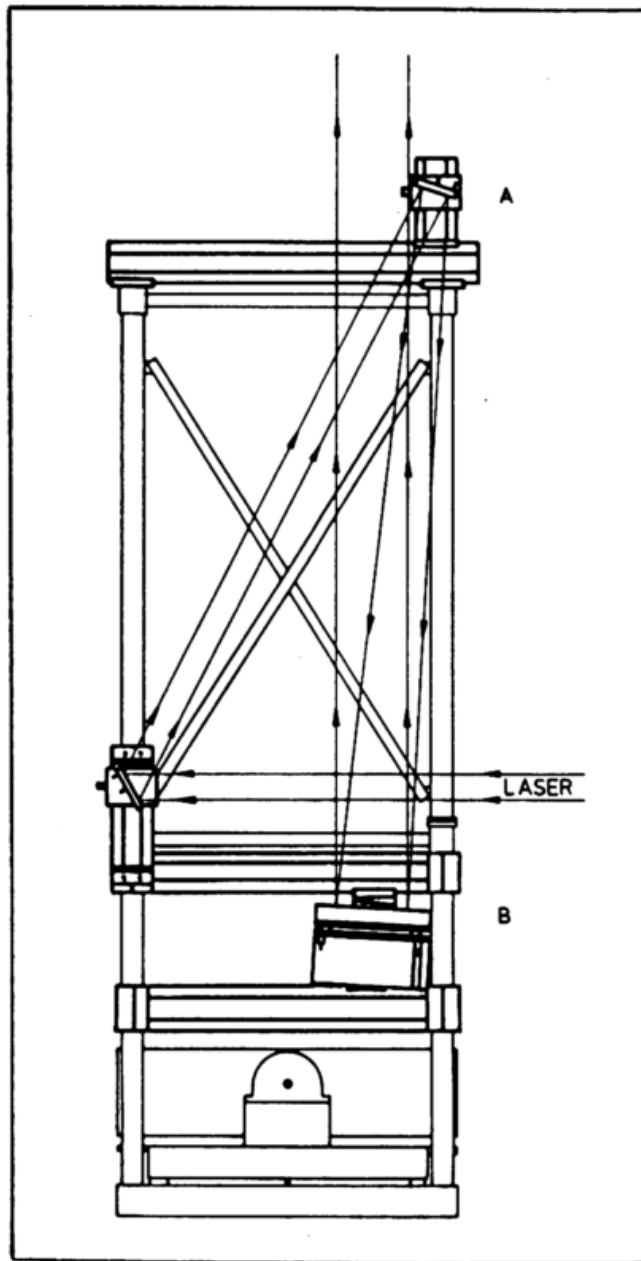


Abbildung 5: Ramanzelle (Die Gasversorgung ist nicht eingezeichnet).

### 3.1.2 Aufweitungsoptik

Dieser Teil besteht aus einem Umlenkspiegel ( $\varnothing = 50 \text{ mm}$ ), einem Konvexspiegel (A) mit Brennweite  $f = -175 \text{ mm}$  ( $\varnothing = 50 \text{ mm}$ ) und einem Konkavspiegel (B) mit Brennweite  $f = 1750 \text{ mm}$  ( $\varnothing = 250 \text{ mm}$ ). Die Anordnung der Spiegel ist in Abbildung 6 zu sehen. Durch das Aufweitungsverhältnis  $1 : 10$  wird die vom Laser herrührende Strahldivergenz um einen Faktor 10 reduziert.



**Abbildung 6:** Anordnung der zur Aussendeoptik gehörenden Spiegel am Gestell des Empfangssystems.

Da das Licht sowohl bei Spiegel A als auch bei Spiegel B schräg zur optischen Achse einfällt, tritt Astigmatismus auf, d. h. Meridionalstrahl und Sagittalstrahl haben unterschiedliche Brennweiten. Es gilt:

$$f_M = f \cdot \cos\theta; f_S = f/\cos\theta \quad (3.1)$$

wobei

- $f$  die Brennweite des jeweiligen Spiegels ist
- $f_M$  bzw.  $f_S$  die dazugehörigen Meridional- bzw. Sagittalbrennweiten sind
- $\theta$  der Einfallswinkel bezüglich der optischen Achse ist

Bei geschickter Wahl der Einfallswinkel  $\theta_A$  und  $\theta_B$  auf die Spiegel A bzw. B läßt sich der Astigmatismus des Gesamtsystems jedoch kompensieren. Sagittalstrahl und Meridionalstrahl verlassen die Aussendeoptik genau dann als parallele Strahlenbündel, wenn  $\theta_A$  und  $\theta_B$  folgende Beziehung erfüllen:

$$\cos\theta_A = -W + (W^2 + 1)^{1/2}$$

$$W := 1/2 \cdot f_A/f_B \cdot ((1/\cos\theta_B) - \cos\theta_B)$$

Für kleine Winkel ergibt sich die einfache Näherung:

$$\theta_A^2 = f_A/f_B \cdot \theta_B^2 \quad (3.2)$$

Der Winkel  $\theta_B$  ist konstruktionsbedingt vorgegeben (Spiegel A darf nicht im Aussendestrahle liegen) und beträgt bei diesem Aufbau  $3.6^\circ$ . Mit diesem Wert erhält man  $\theta_A = 11.5^\circ$ .

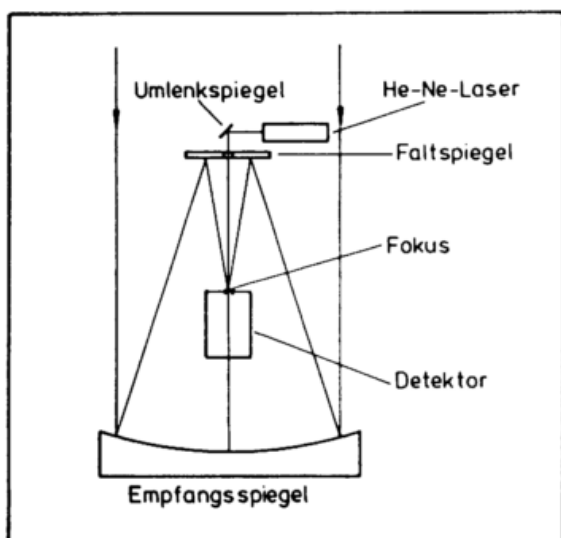
Um hohe Stabilität zu gewährleisten und zugleich einen gewissen Spielraum bei der Positionierung der Komponenten zu gewinnen, wurden die Komponenten an Profilrohren (Spindler & Hoyer) befestigt. Die Profile selbst sind am Rahmen der Empfangsoptik fixiert.

Ausgesandter Laserstrahl und das Gesichtsfeld des Empfangssystems sollten sich immer optimal überlappen. Deswegen kann der Aussendespiegel gegebenenfalls sogar während des Meßbetriebs mit Hilfe von Schrittmotoren, die über Mikrometerschrauben auf die Stellung des Spiegels wirken, nachjustiert werden. Im praktischen Einsatz erwies es sich jedoch, daß aufgrund der Stabi-

lität des hier gewählten Aufbaus eine Nachjustierung im Verlaufe einer Meßnacht so gut wie nie notwendig wurde.

### 3.2 Empfangssystem

Die Empfangsoptik besteht aus dem Dektorblock und zwei justierbaren Spiegeln: Einem sphärischen Hohlspiegel ( $\varnothing = 600 \text{ mm}$ ,  $f = 2400 \text{ mm}$ ) und einem Faltspiegel ( $\varnothing = 200 \text{ mm}$ ,  $\lambda/20$  Planität). Beide Spiegel sind mit Aluminium und hochreflektierenden dielektrischen Schichten bedampft. Der Faltspiegel hat im Zentrum einen Bereich ohne Aluminiumbedampfung von etwa 5 mm Durchmesser, der eine Justierung des Empfangssystems mit Hilfe eines kleinen HeNe-Lasers ermöglicht (siehe Abb. 7).



**Abbildung 7:** Schematischer Aufbau der Empfangsoptik.

Um ein Beschlagen des Spiegels zu verhindern, kann dieser mit einer speziell angefertigten und unterseitig angebrachten Heizfolie über einen entsprechenden Regelkreis temperaturstabilisiert werden. Der Detektorblock ist ein Nachbau des auf der Zugspitze verwendeten Detektors. Er hat die Aufgabe, die beiden Wellenlängen des Rückstreusignals zu separieren und jeweils einem Photomultiplier zuzuführen (Strahlengang siehe Abb. 8). Der Fokus der Eintrittslinse  $L_1$  liegt im Brennpunkt des Empfangsspiegels. Nach Durchgang durch diese Linse ist das Rückstreusi-

gnal ein paralleles Strahlenbündel. Die Separation der beiden Wellenlängen geschieht mit Hilfe eines dichroitischen Spiegels B, der die Wellenlänge 353 nm reflektiert. Beide Signale gelangen über hochreflektierende Umlenkspiegel ( $M_1$  bis  $M_3$ ) auf Interferenzfilter, die das Hintergrundrauschen des Himmelslichtes reduzieren. Nach Durchgang durch die Filter werden beide Signale mit den Linsen  $L_2$  bzw.  $L_3$  auf die Photokathoden der Photomultiplier fokussiert.

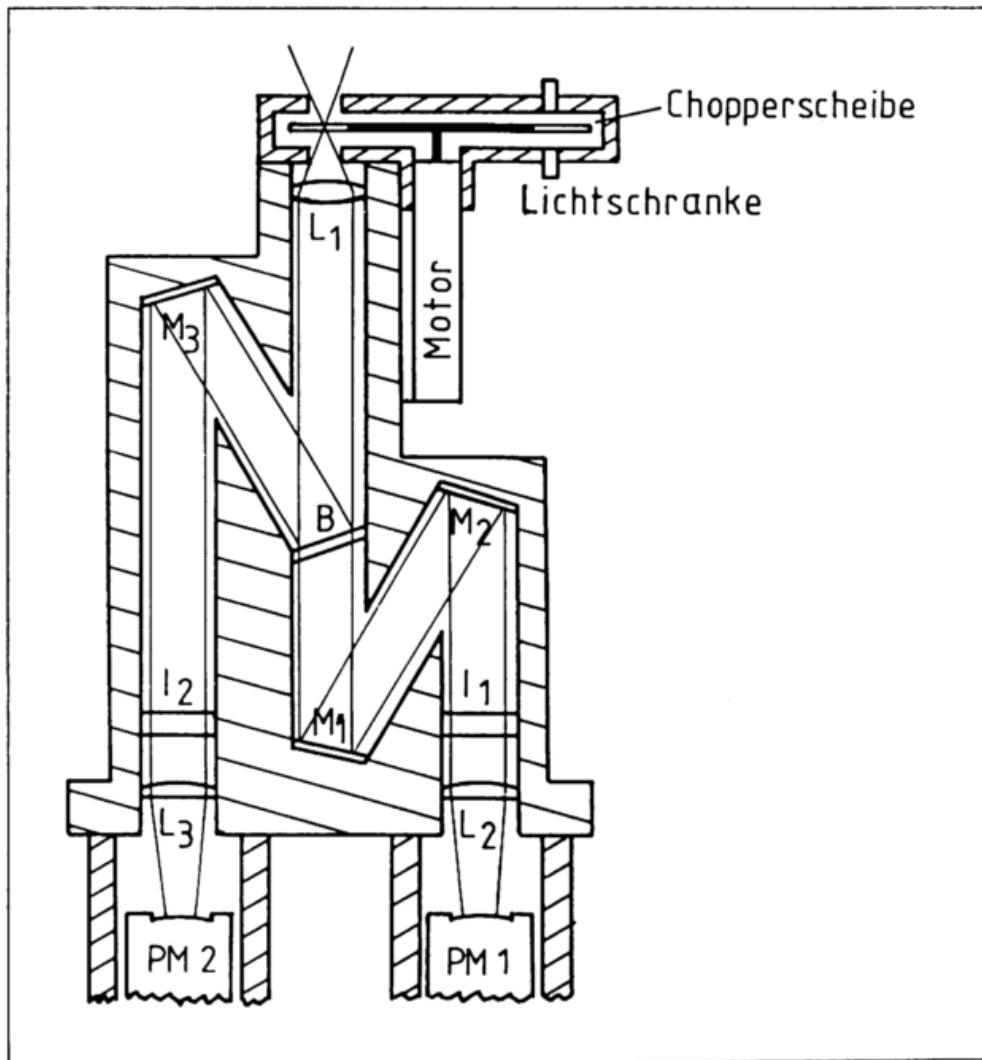
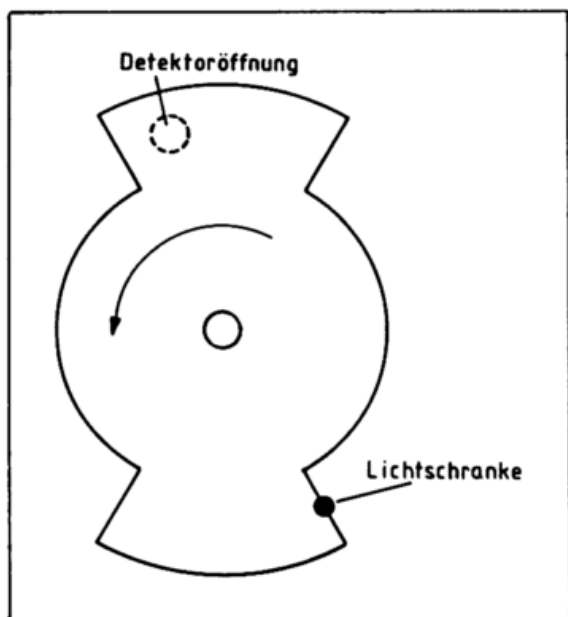


Abbildung 8: Strahlengang im Detektorblock.



**Abbildung 9: Chopperscheibe:** Die Lichtschanke ist so positioniert, daß die Detektoröffnung im Moment des Triggersignals noch vollständig abgedeckt ist. Durch Verzögerung läßt sich die Dauer bis zum Öffnen des Detektoreintritts variieren.

**Tabelle 1: Optische Komponenten des Detektorblocks.**

|                 |   |  |
|-----------------|---|--|
| $L_1$           | Bestformlinse aus Suprasil<br>(entspiegelt)   | $f = 60$ mm<br>$\varnothing = 18$ mm                 |
| B               | Dichroitischer Strahlteiler aus Suprasil<br>Bedampft für max. Reflektion bei 353 nm<br>und max. Transmission bei 308 nm         | $\lambda/10$<br>$\varnothing = 25$ mm                |
| M               | Planspiegel aus Duran<br>Bedampft mit Aluminium und hochreflektierenden dielektrischen Schichten                                | $\varnothing = 25$ mm                                |
| I               | Interferenzfilter<br>a) Zentrumswellenlänge<br>FWHM<br>max. Transmission<br>b) Zentrumswellenlänge<br>FWHM<br>max. Transmission | 353 nm<br>2,5 nm<br>25 %<br>308 nm<br>7,0 nm<br>30 % |
| $L_2, L_3$      | Plankonvexlinsen<br>(entspiegelt)   | $f = 60$ mm<br>$\varnothing = 25$ mm                 |
| Photomultiplier | Thorn Emi 9893Q<br>Fast Photon Counting<br>Dunkelpulsrate   | < 1 Hz   |

Am Eintritt des Detektorblocks befindet sich die Chopperscheibe. Sie wird von einer Bohrspindel mit 25000 U/min angetrieben und läuft in einem - bis auf den Strahldurchtritt - abgeschlossenen Gehäuse. Im Strahldurchtritt können Gesichtsfeldblenden mit verschiedenen Durchmessern eingesetzt werden. Über dem Choppergehäuse ist ein Graufilter positioniert, das mit Hilfe eines kleinen Elektromotors in den Strahlengang geschwenkt werden kann.

Ein Problem stellt die genaue Positionierung des Detektorblockes dar. Die Eintrittsblende muß sich genau im Fokus des Empfangsspiegels befinden, um die Funktion einer Gesichtsfeldblende zu erfüllen. Die einfachste und genaueste Möglichkeit zum Auffinden des Fokus bot die Beobachtung von Sternen über die Empfangsoptik mit einem kurzbrennweitigen Okular ( $f = 20$  mm). Dieses Okular wurde anstelle des Detektorblockes in die optische Achse des Empfangssystems eingebracht. In der Brennebene des Okulars befindet sich ein Fadenkreuz. Wenn sowohl Fadenkreuz als auch Sterne scharf zu sehen sind, liegt das Fadenkreuz genau im Fokus des Empfangsspiegels. Mit dieser Methode konnte die Fokallage des Empfangssystems mit einer Genauigkeit von besser als 1 mm festgelegt werden.

### **3.3 Nachweiselektronik**

Abbildung 10 zeigt sowohl die Systemsteuerung als auch die Datenerfassung.

Die Signale der Photomultiplier werden zunächst von Diskriminatoren in Normpulse (fast NIM) umgewandelt und in einem Zwischenspeicher abgelegt. Dieser Zwischenspeicher wurde durch ein CAMAC-Modul (Le Croy) realisiert. Die Komponenten der CAMAC-Einheit sind:

- a) Programmierbare High Speed Clock, welche die Kanalstandzeit der Zähler und damit die Höhenauflösung bestimmt.

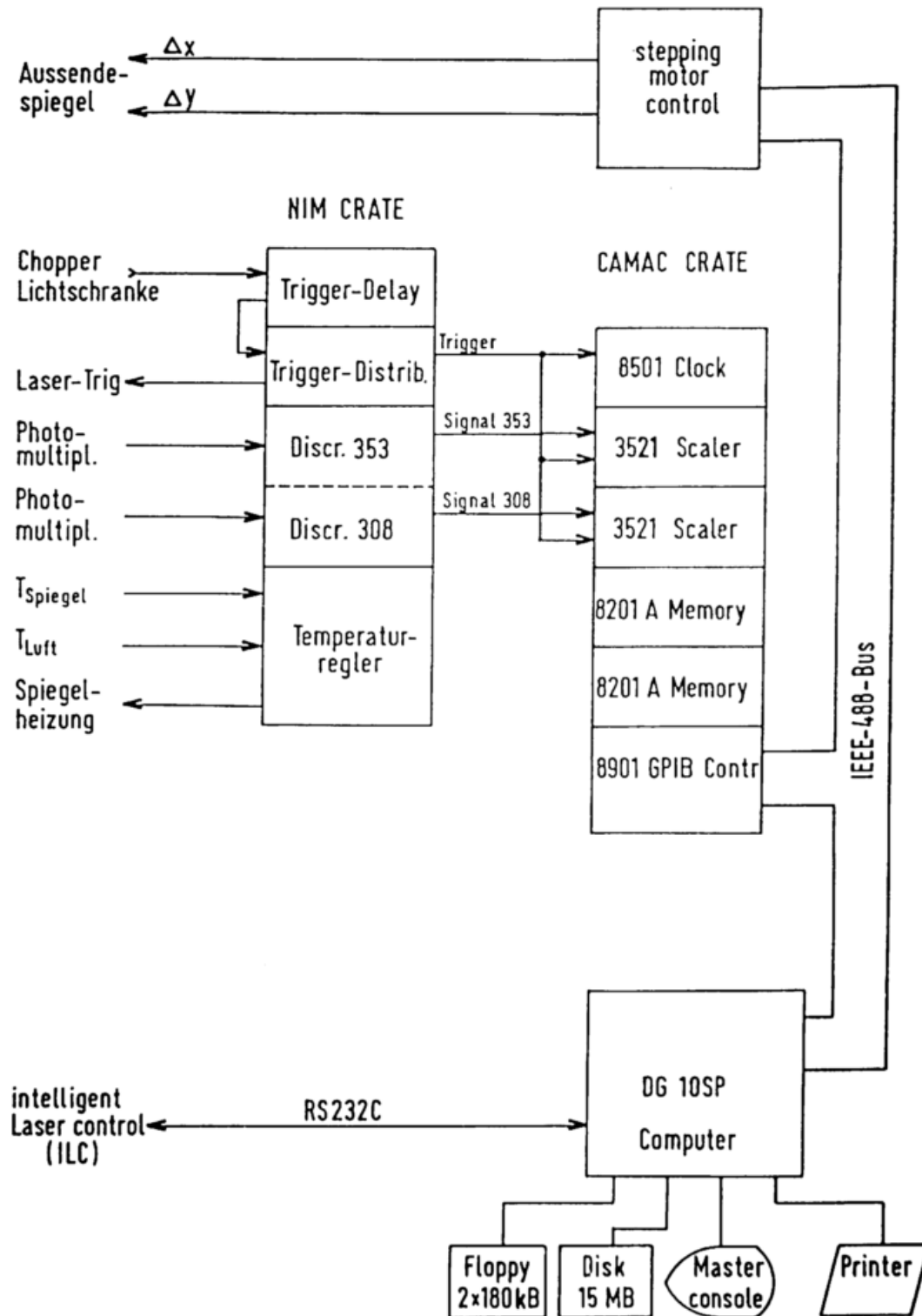


Abbildung 10: Blockschaltbild - Lidarsteuerung - Datenerfassung.

- b) Zwei Zähler (Scaler), die entsprechend der Kanalstandzeit die Diskriminatorensignale der jeweiligen Wellenlänge aufaddieren.
- c) Zwei 32 kByte Speicher, die wechselweise beschrieben und vom Rechner ausgelesen werden.
- d) Controller, der die CAMAC-Einheit verwaltet und die Verbindung zum Rechner herstellt (IEEE-Bus).

Das von der Lichtschranke an der Chopperscheibe erzeugte Signal wird auf 40 Hz heruntergeteilt und triggert über eine einstellbare Verzögerungsschaltung das synchrone Zünden des Lasers und den Beginn der Datenerfassung. Der Laser selbst wird nur bei jedem zweiten Triggerpuls gezündet, so daß nach jedem Laserschuß eine Untergrundmessung erfolgt.

Der Rechner (Data General 10 SP) liest die im Zwischenspeicher akkumulierten Kanalhalte alle 32 Laserpulse aus, subtrahiert den Untergrund vom Rückstreusignal und legt die Daten auf einer Harddisk (15 MByte) ab. Die maximale Triggerfrequenz von 20 Hz wirkt sich günstig auf die Betriebssicherheit des Lasers aus.

## 4 Software und Automation

### 4.1 Allgemeines

Einige organisatorische Rahmenbedingungen des Projekts haben die Softwarestruktur stark beeinflußt und sollen einleitend kurz skizziert werden.

Zur einfacheren Handhabung wurde ein Betriebssystem eingesetzt, das am Observatorium schon seit Jahren benutzt wird. Außerdem wurde ein möglichst leicht zu bedienendes Benutzerinterface angestrebt, wobei die Steuerung durch Funktionstasten realisiert wurde. Aus dem gleichen Grund, und um auch bei etwas unsicherer Witterung die möglichen Meßzeiten optimal nutzen zu können, wurde weitgehende Automation angestrebt. So können Laser, Schachtdeckel, Spiegeljustiermotoren und Graufilter vom Rechner aus bedient und über Signalleitungen ständig überwacht werden. Mit Hilfe dieser Automation schaltet sich das System auch selbsttätig zu Beginn der Morgendämmerung oder bei Eintritt unvorhergesehener Ereignisse ab (s. 4.4).

Modular aufgebaut zerfällt die Software in drei große Bereiche:

- a) Bedienung, Parameteränderung und visuelle Kontrolle des Systems
- b) Datenübernahme und -speicherung
- c) Automation und Überwachung

Vom Meßprogramm logisch getrennt sind eine Reihe von Hilfsroutinen, die eine Nachbereitung und Konsistenzprüfung der Meßdaten im off-line-Verfahren erlauben.

## 4.2 Die Systemdateien

Gefordert war ein System, das sowohl im operationellen Betrieb als auch im Experimentiermodus laufen kann. Es wird daher zur Steuerung eine ASCII-Textfile benutzt, die alle sensiblen Parameter des Systems enthält (z. B. Kanalbreite, Abbruchkriterien, Datenspeicherungsintervalle u. a.). Mit Hilfe verschiedener Funktionstasten können diese Werte interaktiv geändert werden. Sind optimale Einstellungen erreicht, können sie direkt für Routinemessungen eingesetzt werden.

Zur schnellen visuellen Kontrolle und damit zum Erzielen eines optimalen Betriebszustandes stehen zwei Bildschirme zur Verfügung. Der eine zeigt alle zwei Minuten die gemessenen Rückstreu曲ven, d. h. den Logarithmus der pro Kanal gezählten Photonen in Abhängigkeit von der Höhe. Der andere gibt in numerischer Form die Anzahl der gezählten Photonen in einem frei wählbaren "Fenster" des Meßbereichs (ca. alle 2 sec). Beides zusammen ermöglicht ein einfaches Justieren der Anlage zu Beginn der Messung sowie eine schnelle Kontrolle zwischendurch.

Auf dem alphanumerischen Bildschirm werden auch Systemmeldungen im Klartext ausgegeben. Die Fehlertexte sind in einer editierbaren Datei verfügbar und können so dem Bedienerkreis jederzeit angepaßt werden.

Für jede Messung wird außerdem eine Protokolldatei automatisch angelegt, in der alle wichtigen Ereignisse und gegebenenfalls auch Systemstörungen mit Uhrzeit festgehalten sind. Dies ermöglicht insbesondere im Automatikbetrieb die nachträgliche Fehleranalyse.

## 4.3 Die dynamische Organisation

Jedem Aufgabengebiet ist ein eigener Prozeß zugeordnet. Der wichtigste in diesem Zusammenhang ist die Datenübernahme aus

dem Zwischenspeicher sowie Summenbildung und Abspeicherung auf Festplatte in bestimmten Abständen. Der Zwischenspeicher (32 kB) ist als Doppelpuffer ausgelegt. Ist ein Puffer voll, so schaltet er auf den zweiten Puffer und erzeugt nach Beschreiben des letzten Speicherplatzes ein Signal für den Rechner (Interrupt). Der Leseprozeß wird daraufhin aktiviert, holt die Daten in einem "Blockread" ab, benachrichtigt den Aufbereitungsprozeß und wartet auf das nächste Signal. Über eine Zustandsgröße weiß der Leseprozeß immer, ob der Verarbeitungsprozeß schnell genug ist. Ist dies nicht der Fall, werden die Daten so lange verworfen, bis der Aufbereitungsprozeß wieder verfügbar ist. Alle weiteren Prozesse, mit einer Ausnahme, sind dem untergeordnet. Nur der Fehlerprozeß hat absoluten Vorrang, um möglichen Schaden am System zu verhindern (z. B. bei Laserfehlfunktion, Regen, Kühlwasserproblemen usw.). Aktiviert wird er durch ein Signal, das von einer Hardwareüberwachung oder durch eine Meldung vom Mikroprozessor des Lasers erzeugt wird.

#### **4.4 Automation und Überwachung**

##### **4.4.1 Initialisierung**

Vor Beginn der Messung wird aus einer Datei, die die Sonnenunter- und Sonnenaufgangszeiten enthält, und aus der aktuellen Zeit die mögliche Meßzeit errechnet. Dann werden alle Organisationsdateien angelegt, der Laser gestartet und die Aufnahmelogik in den Bereitschaftszustand versetzt. Mit einem Knopfdruck erfolgt dann der eigentliche Start, mit dem alle Komponenten synchron zu arbeiten beginnen.

##### **4.4.2 Untere/obere Messung**

Zur Vergrößerung des Meßbereiches wird mit Abschwächern gearbeitet. Durch das Einfügen von Graufiltern in den Detektorblock wird hierbei das Signal so weit abgeschwächt, daß es auch aus Höhen unterhalb von 22 km nicht die Photomultiplier überlastet

und damit gut auswertbar ist. Es kann nun vorgegeben werden, wie lange mit Abschwächer gemessen werden soll. Nach Ablauf dieser Zeit wird der Abschwächer automatisch aus dem Strahlengang geschwenkt, eine neue Datendatei angelegt und die Messung im Höhenbereich 22 - 50 km bis zur Morgendämmerung fortgesetzt.

#### **4.4.3 Reguläres Ende der Messung**

Sofern keine Störungen auftreten, wird die Messung erst mit Beginn der Morgendämmerung selbständig beendet. Alle bearbeiteten Dateien werden abgemeldet, der Laser abgeschaltet, dessen Wasserkühlung unterbrochen und der Kamindeckel geschlossen. Ein Abschalten des Choppers soll ebenfalls noch realisiert werden.

#### **4.4.4 Vorzeitiges Ende der Messung**

##### **4.4.4.1 Systemverhalten bei Wolkenaufzug**

Während der Messung werden die Daten vor ihrer Abspeicherung auf bestimmte Schwellenwerte untersucht. Werden diese unterschritten (zu wenig Rückstreuung), ist entweder die Anlage dejustiert, oder es ziehen Wolken auf. In beiden Fällen sind die Daten unbrauchbar und werden verworfen. Sind n % der möglichen Meßdaten einer Nacht bereits verworfen, so wird die Messung abgebrochen. Zum einen, weil ein vernünftiges Ergebnis nicht mehr erreicht werden kann, zum anderen, weil evtl. die Gefahr von Niederschlag besteht (aufziehende Front oder Gewitter).

##### **4.4.4.2 Notabschaltung**

Als letzte Sicherung existiert eine Sofortabschaltung. Diese wird bei zwei Ereignissen aktiv:

- a) eine gravierende Fehlermeldung vom Laser
- b) einer der Niederschlagssensoren meldet beginnenden Regen

In beiden Fällen wird sofort der Kamindeckel geschlossen, der Laser abgeschaltet und die Messung unterbrochen.

Die Dateien, welche bis zu diesem Zeitpunkt gespeichert wurden, bleiben uneingeschränkt verfügbar.

#### **4.4.4.3 Rechnerausfall**

Ein permanent laufender Hardwarezähler mit einstellbarem Grenzwert wird mit dem Datenübernahmesignal (vom Rechner erzeugt) immer wieder auf Null zurückgesetzt. Liegt eine Rechnerstörung vor, dann fehlt das Rücksetzsignal, der Zähler läuft über und erzeugt ein Abbruchsignal. Auch hier wird der Kamindeckel geschlossen und der Laser abgeschaltet. Datenverluste können jedoch auftreten, und die Protokollfile bleibt unvollständig.

#### **4.5 Prüfung der Meßdaten**

Da im on-line-Betrieb, bedingt durch sehr hohe Datenraten, nur eine grobe Datenprüfung stattfinden kann, wurden zusätzliche Möglichkeiten zur off-line-Prüfung der Rohdaten entwickelt, so z. B. eine Zeitrafferdarstellung der Rückstreu Kurven und ein Datenprüfalgorithmus. Hauptziel ist eine zeitlich akzeptable Prüfung der umfangreichen Rohdatenmengen, um auch hier den Datenverlust bei teilweise unbrauchbaren Daten zu minimieren, d. h. nur gezielt beeinträchtigte Zeitintervalle zu verwerfen und nicht die ganze Messung.

Erst nach dieser Prüfung findet durch Summation eine drastische Datenreduktion statt. Diese komprimierten Daten stellen dann die Datenbasis für alle weitergehenden Auswertungen dar.

#### **4.6 Erfahrungen und Ausblicke**

Das gesamte System kann als sehr stabil bezeichnet werden. Meßhäufigkeit und Meßgüte liegen über den Erwartungen. Die konse-

quente Automation hat sich sehr gut bewährt, wenn auch z. B. Schneefegen bei klarem Himmel in seltenen Fällen zu Fehlabschaltungen führen kann. Mit der Implementierung eines Justieralgorithmus für den Aussendespiegel mittels rechnergesteuerter Mikrometerschrauben wird die Automation in Kürze vervollständigt. Dann steht ein echtes Turnkey-System zur Ozonmessung zur Verfügung.

## 5 Besondere Probleme

### 5.1 Laser

Gegenüber der auf der Zugspitze eingesetzten Laserversion ist das am Hohenpeißenberg verwendete Nachfolgemodell erheblich zuverlässiger. Laserleistung und -justierung bleiben über mehrere Meßnächte zufriedenstellend. Ein defektes Rückschlagventil an der Vakuumpumpe ließ Öldämpfe in den Laser eindringen und verschmutzte u. a. die Fenster. Der Defekt wurde behoben. Mittlerweile, nach etwa  $10^8$  Schuß, zeigen sich jedoch erste Verschleißerscheinungen. Bei jedem Gaswechsel müssen die Fenster ausgebaut und gereinigt werden. Dennoch kann die früher erzielbare Pulsenergie nicht mehr ganz erreicht werden. Hier wird erst eine Generalüberholung des Gerätes durch die Herstellerfirma Abhilfe schaffen.

### 5.2 Spiegelverschmutzung

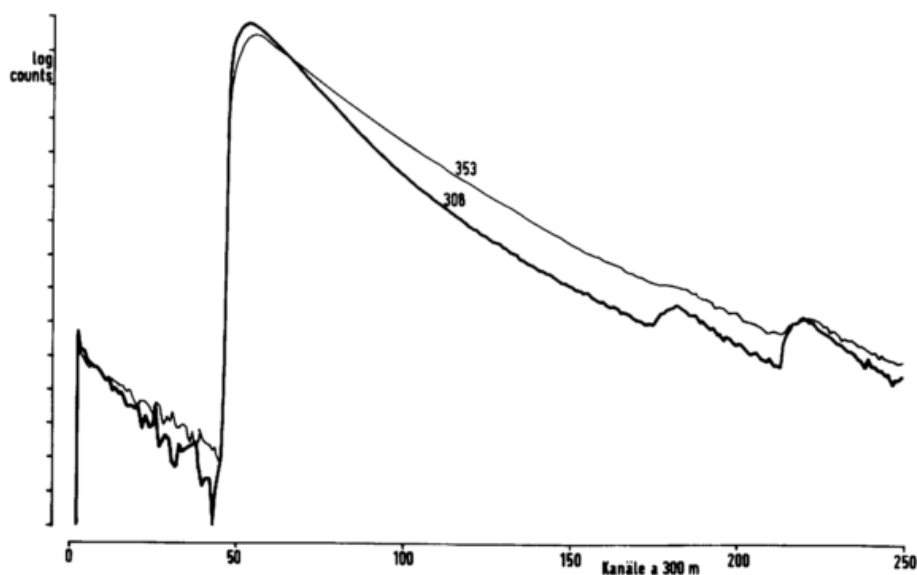
Während des Meßbetriebs sind Aussende- und Empfangsoptik äußeren Einflüssen ausgesetzt. Obwohl die Anlage nur bei klarem Himmel eingesetzt wird, verschmutzen die Spiegel zusehends. Primär wirkt sich hier Staubfall aus, der nicht immer ohne weiteres entfernt werden kann.

Durch Windeinwirkung kam es auch zur Ablagerung von Schnee- oder Reifkristallen, die beim Schmelzen nicht mehr zu beseitigende Ränder der Beschichtung der Spiegel hinterließen. Dies gilt auch für die Ausscheidungen von Insekten, die vom UV-Licht des Lasers besonders stark angelockt werden. Gerade in milden Sommernächten dringen Hunderte solcher Insekten in den Lidarraum ein. Da sowohl Laserstrahl als auch rückgestreutes Licht nicht abgeschwächt werden dürfen, ist eine Beseitigung dieses Problems, z. B. durch irgendwelche Abdeckungen, nicht möglich. Auch der Erfahrungsaustausch mit anderen Lidarbetreibern zeigte keine Lösungsmöglichkeit für dieses Problem. Gegebenenfalls

müssen die Spiegel neu beschichtet werden.

### 5.3 Synchronisationsfehler

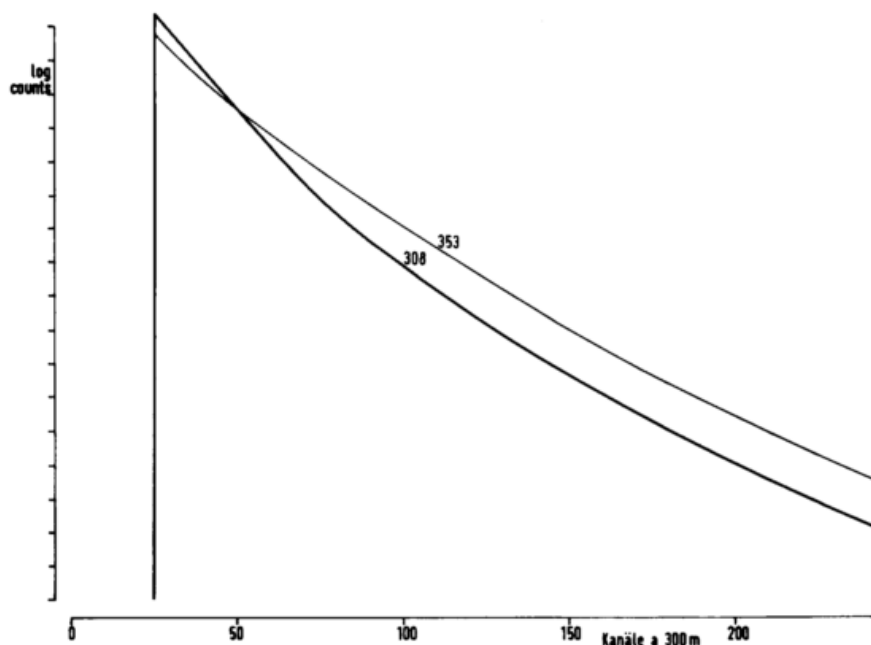
In der Anfangsphase traten in den Rückstreuprofilen (Abb. 11) hin und wieder - zunächst nicht erklärbare - Phänomene (sekundäre Maxima) auf, die die Ozonprofile stark verfälschten. Durch äußerst zeitraubendes und intensives Nachforschen konnte der Fehler im Softwarebereich lokalisiert werden. In selten auftretenden Betriebszuständen des Meßprogrammes (Multitasking) kam es zur asynchronen Datenübernahme auf Platte, so daß kurzzeitig das Rückstreuprofil verschoben wurde. Die Behebung dieser Schwierigkeiten war dann einfach.



**Abbildung 11:** Rückstreuprofile beider Wellenlängen mit Nebenmaxima, die durch asynchrone Datenübernahme verursacht wurden.

#### 5.4 Photomultiplierprobleme

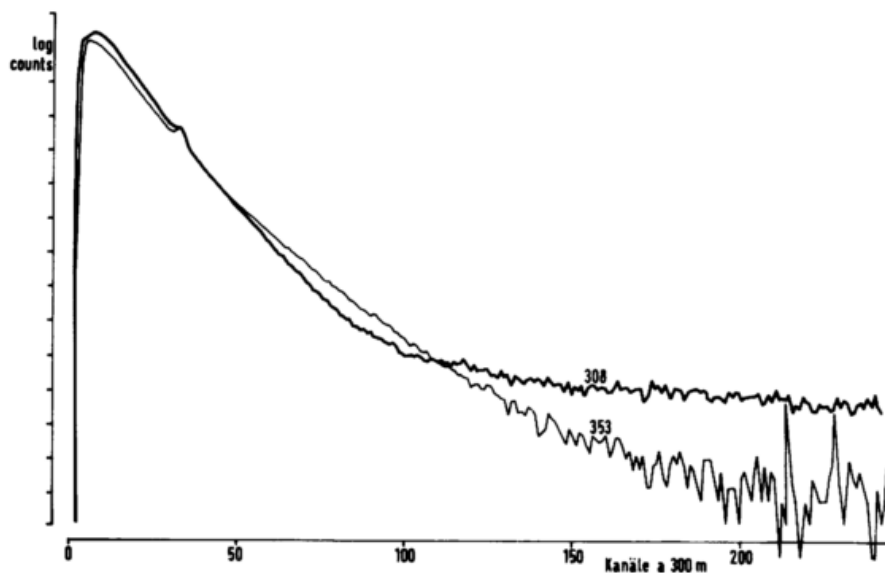
Die im Photon Counting Mode betriebenen Photomultiplier haben die Aufgabe, möglichst alle rückgestreuten Photonen zeitgenau zu erfassen und in elektrische Impulse umzuwandeln. Dabei nimmt die Zählrate innerhalb von 0,5 msec um fünf Dekaden auf Werte nahe Null ab. Die resultierenden Rückstreukurven sind das Produkt aus den in den Kanälen aufsummierten Photonenzählraten. Sogar im logarithmischen Maßstab ist der enorme Abfall der Rückstreurrate mit der Höhe augenscheinlich (Abb. 12). Die Kanalstandzeit beträgt 0,002 msec entsprechend 300 m Vertikaldistanz.



**Abbildung 12:** Unter Annahme einer Normatmosphäre errechnete theoretische Rückstreuprofile.

Die Rückstreukurven beider Wellenlängen müßten dort, wo kein Ozon mehr in der Atmosphäre vorhanden ist, parallel gegen Null abfallen. Ist Ozon vorhanden, fällt die Absorptionskurve (308) steiler ab. Bis zum Herbst 1987 war jedoch festzustellen, daß insbesondere die Kurve der Absorptionswellenlänge 308 nm nicht

diesem Verlauf folgte (Abb. 13), was zu einer Verfälschung der Ozonprofile gerade im Bereich 40 - 50 km führte. Eine umfangreiche Testserie zeigte, daß die speziell auf geringste Dunkelpulsrate selektierten Photomultiplier bei kurz zuvor stattgefundener hoher Belastung keinesfalls eine geringe Dunkelpulsrate aufweisen. Dies wurde erst wieder nach fast 1 msec "Wartezeit" erreicht. Im praktischen Betrieb wurden deshalb Pulse gezählt, die nicht von zurückgestreuten Photonen hervorgerufen wurden. Dieser "Offset" verfälschte besonders in Höhen über 40 km die Messung, da von dort ohnehin nur wenige Photonen zurückgestreut werden.



**Abbildung 13:** Rückstreu Kurven mit "offset", insbesondere bei der Linie 308 nm.

Die vor dem Einbau der Photomultiplier in den Detektorblock durchgeführten aufwendigen Versuche zur Optimierung des Signal-Rausch-Verhaltens wurden unter Praxisbedingungen (d. h. im Meßbetrieb) erneut durchgeführt und so besser angepaßte Werte für die Hochspannungsversorgung und die Diskriminatorschwelle er-

mittelt. Zusätzlich wurde die hohe Anfangszählrate dadurch reduziert, daß die Photomultiplier durch die rotierende Chopperscheibe etwas länger abgedeckt bleiben, wodurch die Spitzenbelastung erheblich vermindert wird. Diese Maßnahmen beseitigten den "Offset" mit seinen negativen Begleiterscheinungen vollständig.

### **5.5 Austausch eines Interferenzfilters**

Obwohl die Laserlinie 308 nm 1,8mal stärker emittiert wird als die sogenannte Referenzwellenlänge 353 nm, ist die Absorption durch das atmosphärische Ozon so stark, daß schon in Höhe von nur 35 km nur noch 20 % der Zählrate der Referenzlinie erreicht wurden. Deswegen wurde der Interferenzfilter 308 nm im Detektorblock, der gerade eine Transmission von 12 % aufwies, gegen eine selektierte Version ausgetauscht, die 30 % Transmission zuläßt. Dadurch wurde die Leistung des Systems in großen Höhen deutlich verbessert.

## 6 Auswertung

Aus den Rückstreuprofilen  $M_1(R)$  bei Absorptionswellenlänge und  $M_2(R)$  bei Referenzwellenlänge ergibt sich das gesuchte Ozonprofil, abgesehen von den Korrekturen  $S(R)$  und  $E(R)$ , aus der Ableitung des Logarithmus des Verhältnisses  $M_2(R)/M_1(R)$  (Abschnitt 2).

$$N_A(R) = \frac{1}{2\Delta\sigma_A} \frac{\partial}{\partial R} \ln \frac{M_2(R)}{M_1(R)} + S(R) - E(R) \quad (6.1)$$

$N_A$  = Teilchendichte des Ozons

$\Delta\sigma_A$  = Absorptionsquerschnittsdifferenz des Ozons bei Absorptions- und Referenzwellenlänge

$S(R)$  = Korrekturterm, der die Wellenlängenabhängigkeit der Streuprozesse berücksichtigt

$E(R)$  = Korrekturterm, der die Wellenlängenabhängigkeit der Extinktion beschreibt, die von den Streuern verursacht wird

Im Falle diskreter Rückstreuprofile muß die Ableitung durch den Differenzenquotient ersetzt werden (s. Abschnitt 2) oder, wie im Auswertungsprogramm durchgeführt, numerisch bestimmt werden (3-Punkt-Ableitung).

Wenn eine reine Rayleigh-Atmosphäre vorliegt, d. h. eine Atmosphäre, deren einzige Streuer die Luftmoleküle (Teilchendurchmesser  $\ll \lambda$ ) sind, gestaltet sich die Korrektur sehr einfach: Der Term  $S(R)$  verschwindet, und der Term  $E(R)$  hat die Form:

$$E(R) = \frac{1}{2\Delta\sigma_A} 2\Delta\sigma_R N_R(R) \quad (6.2)$$

$\Delta\sigma_R$  = Extinktionsquerschnittsdifferenz für Rayleighstreuung bei Absorptions- und Referenzwellenlänge

$N_R(R)$  = Teilchendichte der Luft

Die Teilchendichte der Luft ist tabellarisch hinreichend gut bekannt, so daß der restliche Fehler in der Ozonkonzentration, der durch die Abweichung des tatsächlichen Luftdichteprofiles vom tabellarisch gegebenen Luftdichteprofil herrührt, unter der 1%-Marke liegt (GEH 1987).

Sehr viel komplizierter wird die Situation, wenn neben den Rayleigh-Streuern noch sogenannte Mie-Streuer (Teilchengröße  $\approx \lambda$ ) in Erscheinung treten, wie es der Fall ist, wenn Aerosole in der Atmosphäre vorhanden sind. Die dann nötigen Korrekturen sollen im nächsten Abschnitt behandelt werden.

Neben den oben genannten Korrekturen ist noch die Temperaturabhängigkeit des Absorptionsquerschnittes des Ozons zu berücksichtigen. Untersuchungen von McPETERS und BASS (1982) im Temperaturbereich von 200 bis 300 K zeigten eine Abhängigkeit, die durch eine quadratische Anpassung beschrieben werden kann (Temperatur in °C,  $\sigma$  in  $10^{-20} \text{ cm}^2$ ):

$$\sigma(T) = c_0 + c_1 \cdot T + c_2 \cdot T^2 \quad (6.3)$$

mit  $c_0 = 12,83$ ;  $c_1 = 2,84 \cdot 10^{-2}$ ;  $c_2 = 1,27 \cdot 10^{-4}$  in den entsprechenden Einheiten. Die Genauigkeit dieser Messungen wird im Bereich um 308 nm mit 1 %, im Bereich um 353 nm mit etwa 5 % angegeben. Da die Absorption bei der Referenzlinie um 3 Größenordnungen kleiner ist als bei der Absorptionswellenlänge, ergibt sich insgesamt ein Fehler von  $\Delta\sigma_A$  von etwa 1 %. Im allgemeinen beträgt die Abweichung des stratosphärischen Temperaturprofils vom CIRA-Modell (CIRA 1972) nur wenige Grad, so daß ein von den atmosphärischen Temperaturschwankungen herrührender Fehler in der Ozonkonzentration ebenfalls im Bereich von 1 % liegt.

Von ganz anderer Natur ist die Korrektur, die aufgrund der

Quantennatur des Lichtes notwendig wird. Das Rückstreusignal unterliegt als Summe diskreter Ereignisse der Poisson-Statistik, d. h. eine bestimmte Zählrate  $M(R)$  von Photonen, die aus einem bestimmten Höhenintervall zu erwarten ist, kann um  $\pm [M(R)]^{1/2}$  schwanken. Dieses Rauschen im Rückstreusignal wirkt sich bei der Differentiation (Abschnitt 2) katastrophal aus. Hier ist man gezwungen, die Rückstreusignale in geeigneter Weise zu glätten, bevor die Ableitung gebildet wird. Natürlich impliziert jede Glättung des Signals eine Reduzierung der Ortsauflösung, die hardwareseitig 300 m beträgt (2  $\mu$ s Kanalstandzeit). Ortsauflösung und Genauigkeit der errechneten Ozonkonzentration verhalten sich komplementär zueinander, d. h. je genauer die Ozonkonzentration bekannt ist, desto ungenauer ist die Angabe der Höhe, in der diese Konzentration vorherrscht. In dem am MOHp vorliegenden Auswertungsprogramm wurde versucht, einen möglichst guten Kompromiß zwischen Ortsauflösung und Genauigkeit der Ozonkonzentration zu erreichen, wobei in den größeren Höhen das Hauptaugenmerk auf die Meßgenauigkeit gerichtet wurde. Hierzu wird in Abschnitt 6.2 eingegangen.

Bei der Betrachtung der Meßgenauigkeit muß auch eine mögliche Querempfindlichkeit gegenüber anderen Substanzen berücksichtigt werden. Die einzige hierfür in Frage kommende Substanz ist  $SO_2$ , das ein dem Ozon ähnliches Absorptionsspektrum aufweist. Dieses Spurengas ist in Höhen über 3000 m jedoch nur noch in so geringen Mengen vorhanden, daß es für Messungen in der Stratosphäre praktisch keine Rolle mehr spielt.

### 6.1 Aerosole und Aerosolkorrektur

Bei Anwesenheit von Aerosolen muß von der vollständigen Lidargleichung ausgegangen werden (vgl. Abschnitt 2):

$$M(\lambda, R) = M_0(\lambda) \cdot E(\lambda) \cdot \frac{F}{R^2} \cdot [\beta_R(\lambda, R) + \beta_M(\lambda, R)] \cdot \Delta R \cdot T^2(\lambda, R) \quad (6.4)$$

$$T^2(\lambda, R) = \exp \left[ -2 \cdot \int_0^R [\alpha_A(\lambda, r) + \alpha_R(\lambda, r) + \alpha_M(\lambda, r)] \cdot dr \right] \quad (6.5)$$

$M_0(\lambda)$  = emittierte Photonenzahl

$E(\lambda)$  = Effizienz des Nachweissystems

$F$  = Fläche des Empfangsspiegels

$$\beta_k(\lambda, R) = N_k(R) \cdot d\sigma_k/d\Omega | \pi(\lambda) \quad k \in \{R, M\} \quad (6.6)$$

$N_R(R)$  = Teilchendichte der Rayleigh-Streuer

$N_M(R)$  = Teilchendichte der Mie-Streuer

$N_A(R)$  = Teilchendichte des Ozons

$d\sigma_k/d\Omega | \pi(\lambda)$  = Rückstreu-Wirkungsquerschnitt für Rayleigh- und Mie-Streuung

$$\alpha_k(\lambda, R) = N_k(R) \cdot \sigma_k(\lambda) \quad k \in \{A, R, M\} \quad (6.7)$$

$\sigma_R(\lambda), \sigma_M(\lambda)$  = Extinktionsquerschnitt

$\sigma_A(\lambda)$  = Absorptionsquerschnitt von Ozon

Besitzt man Kenntnis über das Aerosolrückstreuverhältnis  $\beta_M/\beta_R$  bei beiden Wellenlängen, so kann der Einfluß der Aerosole eliminiert werden.  $\beta_M/\beta_R$  kann aus dem Referenzsignal gewonnen werden, sofern zusätzliche Annahmen getroffen werden:

1.  $\beta_M$  und  $\alpha_M$  sind einander proportional mit der Proportionalitätskonstanten  $\Gamma$ :

$$\alpha_M = 1/\Gamma \cdot \beta_M; \Gamma = 0.022$$

2. Die Wellenlängenabhängigkeit von  $\beta_M$  wird beschrieben durch:

$$\beta_M(\lambda_1)/\beta_M(\lambda_2) = (\lambda_2/\lambda_1)^\tau \text{ mit } \tau = 1.6$$

3. Über 30 km Höhe sind keine Aerosole mehr vorhanden

4.  $\beta_R$  ist hinreichend gut bekannt (Modellatmosphäre)

Die Annahmen 1. und 2. stützen sich auf Überlegungen von WERNER (1984) und repräsentieren die Verhältnisse für vulkanische Aerosole in der Stratosphäre, z. B. El Chichon, 1982.

Gleichung (6.4) läßt sich umschreiben in die Form:

$$M(\lambda, R) = M_0(\lambda) \cdot E(\lambda) \cdot \frac{F}{R^2} (1 + \rho_M) \cdot \beta_R \cdot \Delta R \cdot \exp \left[ -2 \cdot \int_0^R (\alpha_A + \alpha_R) dr \right] \cdot \exp \left[ -2 \cdot \int_0^R \alpha_M dr \right] \quad (6.4^*)$$

$$\rho_M = \beta_M / \beta_R$$

Multipliziert man diese Gleichung mit

$$\frac{1}{(1 + \rho_M)} \cdot \exp \left[ 2 \cdot \int_0^R \alpha_M dr \right] \text{ mit } \alpha_M = \beta_R \cdot \rho_M / \Gamma,$$

so erhält man die Lidargleichung für eine reine Rayleighatmosphäre, die dann gemäß Gleichung (6.1) ausgewertet werden kann, wobei wie oben beschrieben  $E(R)$  die Form (6.2) hat und  $S(R)$  verschwindet.

Zur Berechnung des Aerosol-Rückstreuverhältnisses wird das Referenzlinien-Rückstreusignal  $M(R)$  mit dem theoretischen Rückstreusignal  $M^t(R)$  einer reinen Rayleighatmosphäre verglichen, das bis auf eine Konstante aus einer Modellatmosphäre (Druck, Temperatur, Ozon) berechnet werden kann. Hierbei ist zu beachten, daß das Modell-Ozonprofil für das Rückstreusignal bei der Referenzlinie von untergeordneter Bedeutung ist: Das Verhältnis  $\alpha_R / \alpha_A$  hat bei einer Wellenlänge von 353 nm den Wert 30, so daß das Integral in Gleichung (6.5) im wesentlichen durch das Luftdichteprofil bestimmt ist. Nach Voraussetzung 4. ist  $\beta_R^t(R) \approx \beta_R(R)$  und damit auch  $\alpha_R^t(R) \approx \alpha_R(R)$ . Aus dem Verhältnis

$M(R)/M^t(R)$  ergibt sich schließlich durch Umformung für  $\rho_M$  eine Riccatische Differentialgleichung. Diese Gleichung kann in eine entsprechende Integralgleichung umgeformt werden:

$$\rho_M = \exp \left[ \ln(M/M^t) + 2 \cdot \int_0^R \beta_R^t \cdot \rho_M / \Gamma \cdot dr - \ln(C) \right] - 1 \quad (6.8 a)$$

Ein Problem stellt hierbei die unbekannte Konstante C dar. Sie ist das Verhältnis von tatsächlichem Rückstreusignal einer reinen Rayleigh-Atmosphäre und dem theoretischen Rückstreusignal, d. h. sie beinhaltet unbekannte Geräteparameter, wie effektive Empfangsfläche und Nachweiseffizienz. Bei der Berechnung von C geht die Annahme 3. ein, daß ab einer Höhe von etwa 30 km (=  $R^*$ ) keine Aerosole mehr vorhanden sind. In diesem Fall reduziert sich Gleichung (6.8 a) auf die Form:

$$0 = \exp \left[ \ln(M/M^t) + 2 \cdot \int_0^{R^*} \beta_R^t \cdot \rho_M / \Gamma \cdot dr - \ln(C) \right] - 1; \text{ für } R > R^*$$

Es folgt

$$\ln(C) = \ln(M/M^t) + 2 \cdot \int_0^{R^*} \beta_R^t \cdot \rho_M / \Gamma \cdot dr \quad (6.8 b)$$

Aus den Gleichungen (6.8 a) und (6.8 b) lassen sich Rekursionsvorschriften zur Bestimmung des Aerosolrückstreuverhältnisses und der Konstante C formulieren (GEH 1988).

Um die Konvergenzeigenschaften und die Genauigkeit der hier verwendeten Aerosolkorrektur zu untersuchen, mußten Simulationsrechnungen durchgeführt werden, da im Zeitraum 1986/87 keine merklichen Aerosolkonzentrationen in der Stratosphäre vorhanden waren. Für die Simulation wurde ein eigenes Programm geschrieben, das es erlaubt, theoretische Rückstreusignale mit Aerosolen zu versehen und im gleichen Datenformat wie die gemessenen Rückstreuprofile abzuspeichern. Bei der Auswertung zeigte sich, daß die Iteration meist schon nach weniger als 10 - 15 Schritten konvergierte, wobei das ermittelte Aerosol-Rückstreuverhältnis sehr gut mit den Vorgabewerten übereinstimmte. Ledig-

lich bei dünnen Schichten mit hoher Aerosolkonzentration führten die Glättungsprozeduren des Auswertungsprogramms zu abweichenden Ergebnissen in der Aerosolkonzentration.

Eine Genauigkeitsaussage für die Bestimmung tatsächlicher Aerosolvorkommen in der Stratosphäre gestaltet sich schwierig, da neben den Abweichungen von Druck und Temperatur gegenüber den Theoriewerten auch Abweichungen der Werte  $\Gamma$  und  $\tau$  (Annahmen 1. und 2.) möglich sind. Die Verlässlichkeit der vom Lidar ermittelten Ozonprofile muß im Falle erneut auftretender stratosphärischer Vulkan-Aerosole überprüft werden.

## 6.2 Glättungsprozeduren und Ortsauflösung

Im Auswertungsprogramm wird an zwei Stellen geglättet:

1. Glättung der Rückstreusignale
2. Glättung des Verhältnisses  $M_2/M_1$  der Rückstreusignale

Bei der Glättung der Rückstreusignale wurde darauf geachtet, daß ihre wahre Gestalt so wenig wie möglich beeinflusst wird. Jede Glättung setzt eine Annahme über den Kurvenverlauf voraus, wie etwa "stückweise linear" oder "stückweise kubisch" usw. Bei der hier verwendeten Glättung wurden die Rückstreusignale durch Stücke der theoretischen Rückstreusignale ersetzt, bei denen in jedem Glättungsintervall zwei Parameter zur optimalen Anpassung im Sinne kleinster quadratischer Abweichung zur Verfügung stehen.

Sei  $M_j(i)$  das gemessene Rückstreusignal und  $M_j^t(i)$  das theoretische Rückstreusignal bei der Wellenlänge  $j$  im Kanal  $i$ . Sei außerdem  $k(i)$  die Anzahl der Kanäle, die rechts und links von Kanal  $i$  zur Glättung herangezogen werden. Zur Bestimmung der Anpassungsparameter  $a_0(i)$  und  $a_1(i)$  wird für alle  $i$  der Ausdruck

$$\sum_m [M_j(m) - a_0(i) - a_1(i) \cdot M_j^t(m)]^2 = \min, m \in [i - k(i), i + k(i)] \quad (6.9)$$

minimiert. Der Schätzwert für  $M_j(i)$  ist dann  $a_0(i) + a_1(i) \cdot M_j^t(i)$ . Die Breite des Glättungsintervalls wird für jeden Kanal vorher in einer eigenen Routine bestimmt. Dazu werden die Zählraten benachbarter Kanäle aufaddiert. Aus den Zählraten läßt sich anhand einer einfachen Fehlerbetrachtung (GEH 1987) eine Abschätzung für den relativen Fehler  $O_3(R)$  angeben. Im Programm wird umgekehrt vorgegangen. Hier wird ein relativer Fehler von 2 % vorgegeben und mit Hilfe eines theoretischen Ozonprofils der zugehörige absolute Fehler  $O_3(R)$  berechnet. Aus diesem wird die Anzahl der Photonen-Counts bestimmt, die notwendig ist, um diesen Fehler zu erreichen. Der Quotient dieser Zahl und der Zählrate im interessierenden Kanal ergibt die Breite des Glättungsintervalls (bis maximal  $\pm 14$  Kanäle, darüber wird eine Zunahme des relativen Fehlers in Kauf genommen). Dies ist die Grundidee, die hinter der Bestimmung des Glättungsintervalles steckt. Die tatsächliche Berechnung im Programm weicht geringfügig von obiger Darstellung ab, da sie im Laufe der Programm-entwicklung immer wieder abgeändert und optimiert wurde.

Die so ermittelten Breiten der Glättungsintervalle gehen auch in die Glättung des Verhältnisses  $M_2/M_1$  ein. Bei der zweiten Glättung kommt ein gewichtetes gleitendes Mittel zur Anwendung. Kanäle, die näher am auszuwertenden Kanal liegen, werden entsprechend stärker gewichtet als solche, die am Rand des Glättungsintervalls liegen. Bevor die zweite Glättung durchgeführt wird, wird am oberen Ende der Messung eine theoretische  $M_2/M_1$ -Kurve angepaßt, so daß die Meßkurve über den letzten brauchbaren Kanal fortgeführt werden kann. Dadurch muß die Glättungsintervallbreite an der oberen Grenze des Meßbereichs nicht verringert werden. Am unteren Ende des Lidarprofils betragen die Breiten der Glättungsintervalle typisch nur 1 bis 2 Kanäle, die damit kaum über den Meßbereich hinausragen. Ein Anschluß einer theoretischen Kurve ist daher für die Glättung nicht notwendig. Um aus dem gemessenen Ozonprofil das integrale Ozon (Dobson

Units) angeben zu können (s. 7.2), wird zu einem späteren Zeitpunkt an das fertig berechnete Ozonprofil im unteren Bereich ein mittleres Ozonprofil für die entsprechende Jahreszeit angeschlossen.

Die oben angeführten Glättungen führen natürlich zu einer gewissen Orts-Unschärfe der Ozonkonzentration. Die physikalische Auflösung von 300 m/Kanal kann nach einer Glättung nicht mehr als Angabe für die Ortsauflösung dienen. Die hier verwendeten Glättungen lassen sich beide als gewichtete Mittelungen verstehen:

$$\langle M(i) \rangle = \sum_{j=i1}^{i2} p_j \cdot M(j), \quad \sum_{j=i1}^{i2} p_j = 1, \quad j \in [i1, i2] \quad (6.10)$$

Wobei  $p_j$  der jeweilige Gewichtungsfaktor ist. Die effektive Ortsauflösung wurde hier als mittlere quadratische Abweichung der Kanalabstände interpretiert, gewichtet mit den Gewichtungsfaktoren  $p_j$ :

$$\Delta x(i) := \left[ \sum_{j=i1}^{i2} p_j(i) \cdot (i-j)^2 \right]^{1/2} \cdot \Delta R, \quad \Delta R = 300 \text{ m} \quad (6.11)$$

Dies entspricht der Ortsunsicherheit, die allein durch eine Glättung entsteht. Wenn schon vorher eine Ortsunsicherheit vorhanden war, so wird die neue Ortsauflösung nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz berechnet. Ausgegangen wird von der Kanalauf-lösung:

$$\Delta x(i) = 300 \text{ m}$$

Bei Glättung 1 wird der Gewichtungsfaktor  $p_j(i)$  aus den Koeffizienten  $a_0$  und  $a_1$  (6.9) durch arithmetische Umformung bestimmt. Bei der zweiten Glättung sind die Gewichtungsfaktoren bereits vorgegeben. Die Ortsauflösung, die sich nach der 2. Glättung ergibt, wird wieder über das Gaußsche Fehlerfortpflanzungsgesetz bestimmt.

Wenn  $i$  in der Mitte des Glättungsintervalles liegt, so gilt:

$$\sum_{i_1}^{i_2} p_j(i) = 1 \text{ und } p_j(i) \geq 0 \text{ für alle } j \quad (6.12)$$

An den Rändern des Rückstreuprofils liegt  $i$  nicht mehr in der Mitte des Glättungsintervalles. Hier kommen auch negative  $p_j$  vor, und die Summe über die  $p_j$  ist nicht mehr gleich 1. Es ist klar, daß das Vorzeichen der Gewichtung für die Ortsauflösung keine Rolle spielt. Daher wurde generell statt  $p_j(i)$  folgende Gewichtung verwendet:

$$P_j(i) = |p_j(i)| / \sum_{i_1}^{i_2} |p_j(i)| \quad (6.13)$$

### 6.3 Fehler der Ozonkonzentration

Ausgehend von den gegebenen Fehlern der Rückstreusignale  $M_k(i)$ , die nach der Poissonstatistik  $(M_k(i))^{1/2}$  betragen,  $k = 1, 2$ , wird parallel zu jedem Berechnungsschritt (Logarithmierung, Glättung, Verhältnisbildung, Differentiation usw.) eine konsequente Fehlerfortpflanzungsrechnung durchgeführt, die am Ende der Berechnung ein Maß für den Fehler der Ozonkonzentration in dem jeweils betrachteten Höhenbereich ergibt. Eine Berücksichtigung der Fehler für Aerosol-, Rayleigh- und Temperaturkorrekturen, die sich alle auf theoretische Größen stützen, findet nicht statt. Die Überlegungen von WERNER (1984) zeigen jedoch, daß die Fehler, die sich dadurch ergeben, insgesamt kaum mehr als 1 % betragen, sofern keine außergewöhnlichen Verhältnisse in der Stratosphäre vorliegen.

## 7 Ergebnisse

### 7.1 Test- und Erprobungsphase

Die Weiterentwicklung und ständige Verbesserung des Lidarsystems während des Jahres 1987 kann am besten anhand der Ozonprofile verfolgt werden. Sie sind aus Dokumentationsgründen teilweise im Original abgebildet.

Eine der ersten Ozonmessungen, die mit der neu errichteten Anlage durchgeführt werden konnte, ist die vom 28./29. April 1987 (Abb. 14). Diese Messung überdeckte zwar gerade nur den Höhenbereich von 24 - 45 km, lieferte jedoch schon ein insgesamt plausibles Ozonprofil. Die Überlappung mit dem Brewer/Mast-Sonden-Profil ist jedoch noch bedeutungslos, da der Überlappungsbereich zu klein ist und die Deckung der Profile zufälliger Natur sein kann.

In Abbildung 15 reicht der Überlappungsbereich zwar von 17 - 33 km, die Übereinstimmung ist aber äußerst schlecht, und das Lidar "produziert" ab 36 km Höhe negative Ozonwerte. In diesem Fall zeigt sich ganz besonders der in Abschnitt 5.3 angesprochene und während der Erprobung beseitigte Synchronisationsfehler.

Schon erheblich vorteilhafter ist die Darstellung vom 2.10.1987 (Abb. 16). Zwei Lidarprofile decken einen Bereich von 16 - 48 km ab. Die Messung im unteren Teil wurde mit Graufilter durchgeführt. Dort, wo die beiden Lidarprofile sich überschneiden, ist die Deckung gut; die geringfügige Abweichung im Ozonmaximum kann als realistisch angesehen werden, da die Messungen nacheinander durchgeführt wurden.

|                   |            |                   |
|-------------------|------------|-------------------|
| Lidar             | 15 - 30 km | 20.44 - 21.49 MEZ |
|                   | 24 - 47 km | 22.07 - 05.08 MEZ |
| Brewer/Mast-Sonde | 01 - 33 km | 08.10 - 09.51 MEZ |

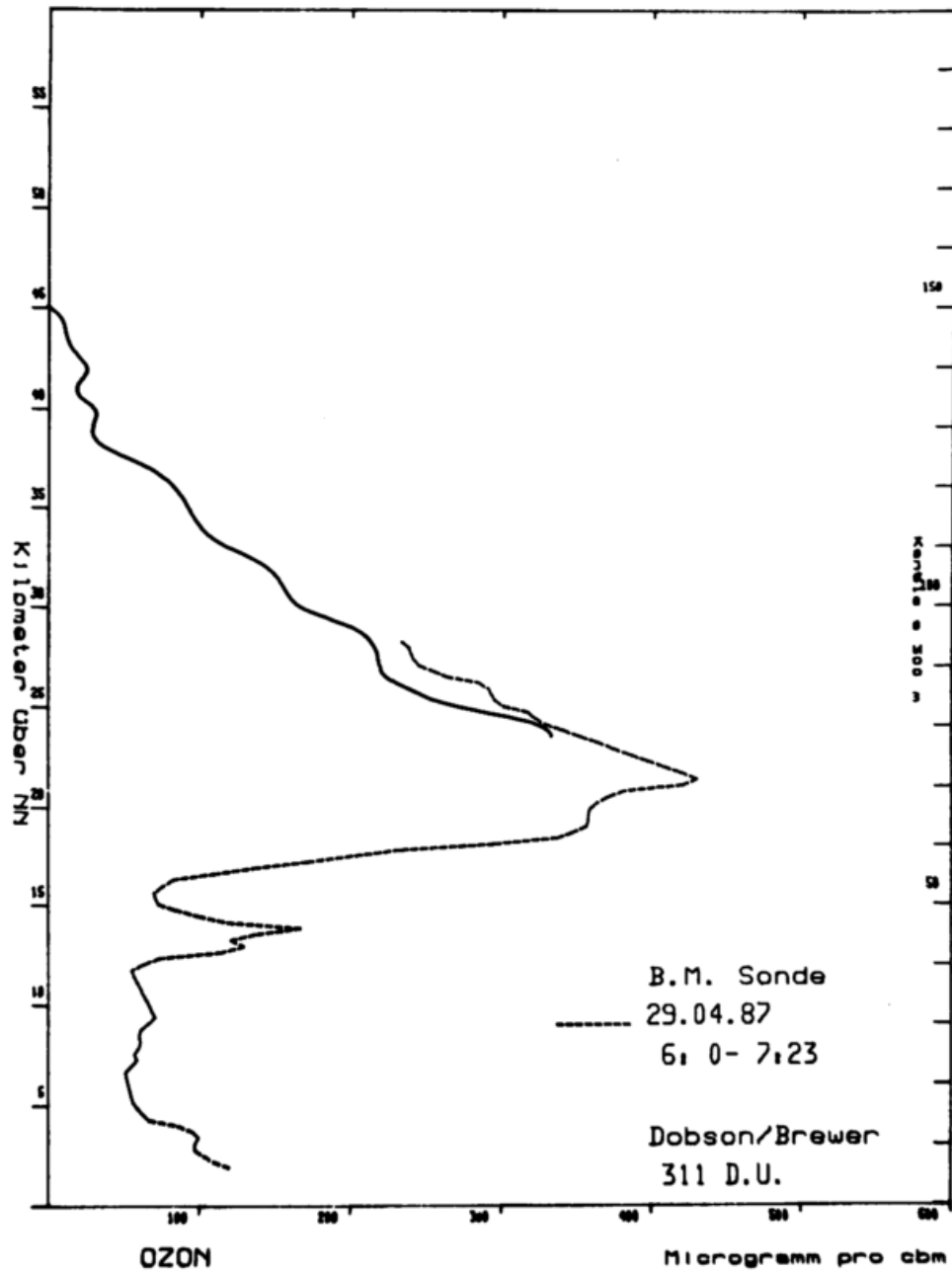


Abbildung 14: Ozonprofile vom 28./29. April 1987; Lidar (ausgezogen), Sonde (strichliert).

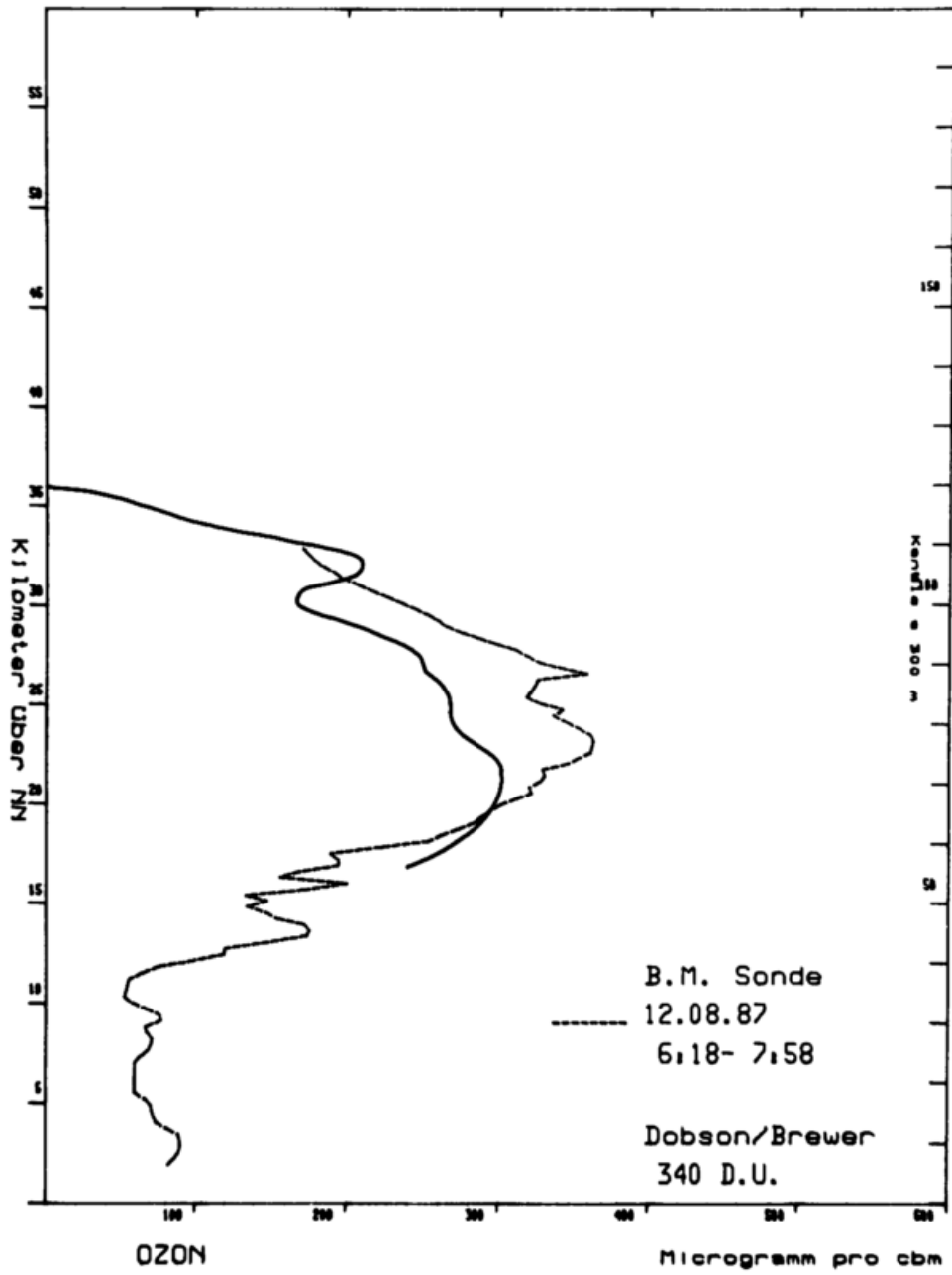


Abbildung 15: Ozonprofile vom 11./12. August 1987; Lidar (ausgezogen), Sonde (strichliert).

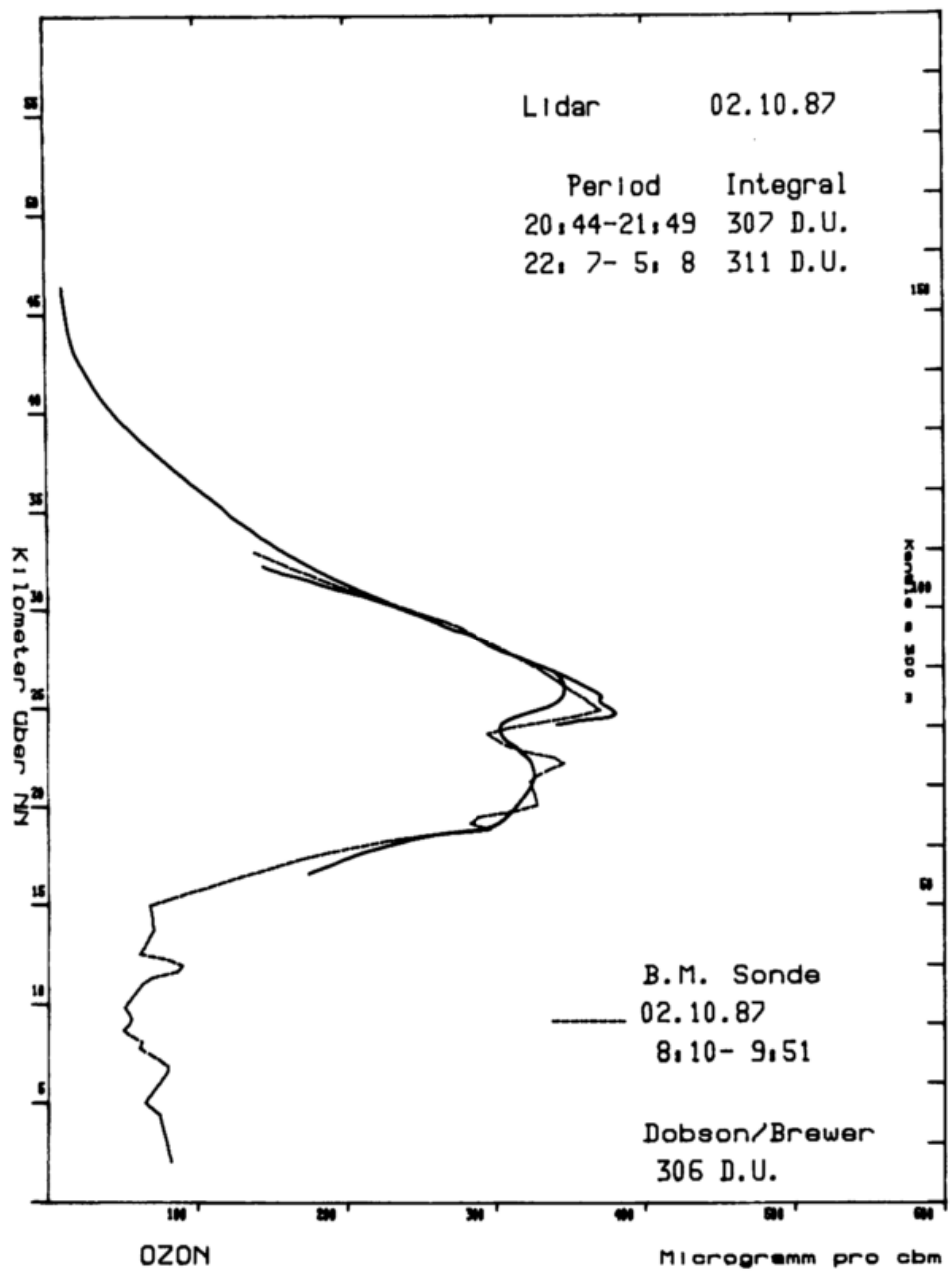


Abbildung 16: Ozonprofile vom 1./2. Oktober 1987.

Die Übereinstimmung mit der Sondierung durch die Brewer/Mast-Sonde ist ebenfalls zufriedenstellend. Wenn auch geglättet, wurden mit dem Lidar doch die gleichen Strukturen in der vertikalen Ozonverteilung festgestellt. Das System arbeitete zu diesem Zeitpunkt bereits einwandfrei, lediglich das Auswertungsprogramm ließ noch zu wünschen übrig. Die Glättungsroutinen unterdrückten feinere Strukturen im Profil noch zu stark, und auch die Rayleighkorrektur war noch nicht implementiert.

Inwieweit die endgültige Version des Auswerteprogramms die Güte der Messung steigerte, demonstriert Abbildung 17. Trotz einer Integrationszeit von einigen Stunden zeigt die Lidarmessung keineswegs eine Glättung, sondern erstaunlich differenzierte Strukturen, die der Sondierung (Integrationszeit  $\sim 1$  Minute) in nichts mehr nachsteht. Dies zeigt, daß weder die Sonde nur ein "Augenblicksprofil" darstellt noch das Lidar über alle Strukturen hinweg glättet. Auch hier erfolgten beide Messungen nicht zeitgleich! Der obere Teil der Lidarmessung (25 - 50 km) ist bei einer Integrationszeit von etwa 4 Stunden bis 50 km auswertbar und deckt sich im Überschneidungsbereich fast vollständig mit der Sondierung.

Daß sowohl außerordentlich hohe Übereinstimmung als auch größere Abweichungen auftreten können und diese aber auch plausibel sind, zeigt Abbildung 18.

In der unteren Stratosphäre sind Lidar- und Sonden-Profil fast deckungsgleich, obwohl die Messungen ca. 10 Stunden auseinanderliegen. Hier müssen meteorologisch so stabile Verhältnisse vorgelegen haben, daß sich die vertikale Ozonverteilung innerhalb dieser Zeitspanne kaum verändert hat. Im Bereich des Ozonmaximums zwischen 21 und 27 km Höhe dagegen reichte diese Zeit aus, um mit der Sonde dort eine veränderte Ozonvertikalverteilung zu messen. Auch der räumliche Abstand kann in diesem Fall eine Rolle gespielt haben. Infolge starker Westwinde befand sich die Sonde zur Zeit der Messung in diesem Höhenbereich etwa 80 km ostwärts von Hohenpeißenberg.

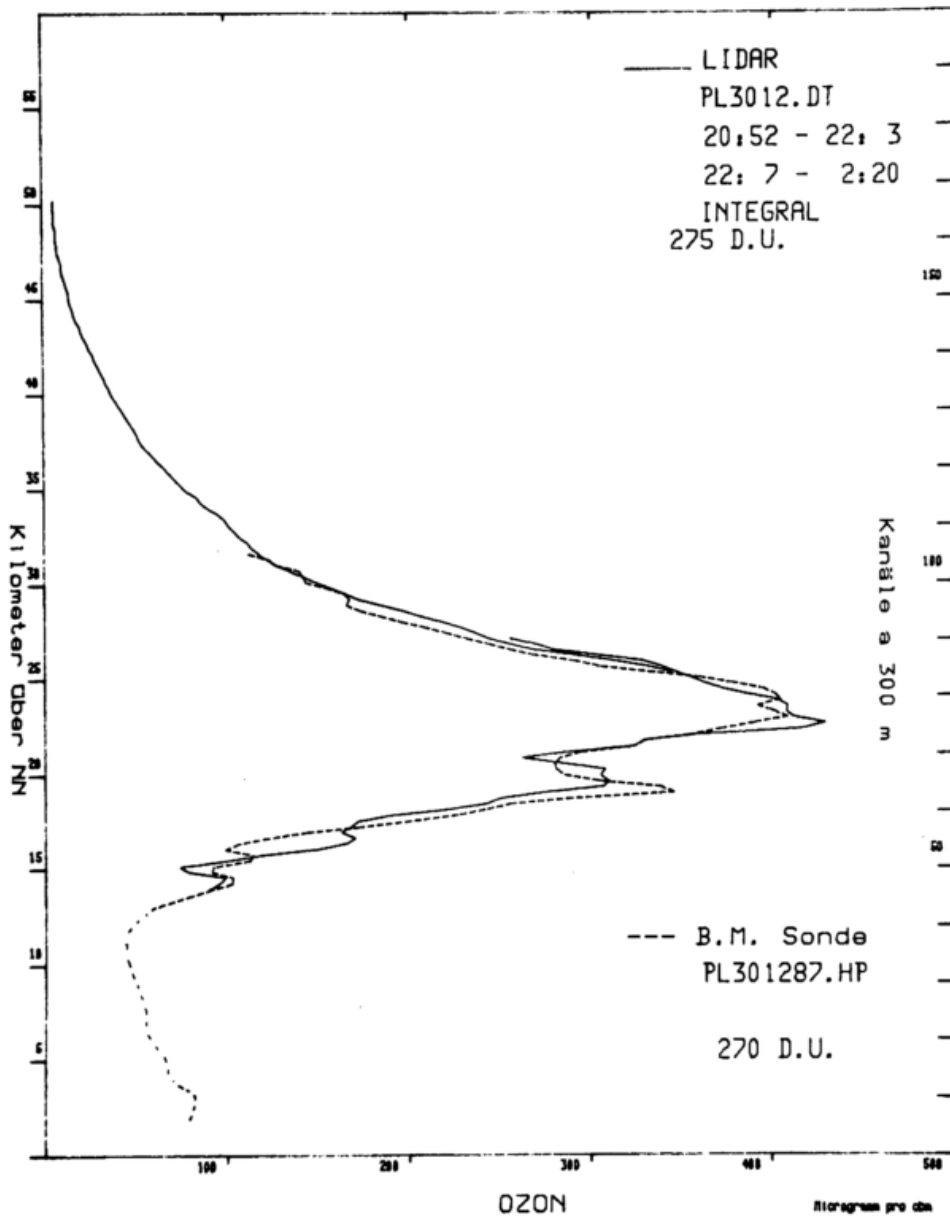


Abbildung 17: Ozonprofile vom 29./30. Dezember 1987.

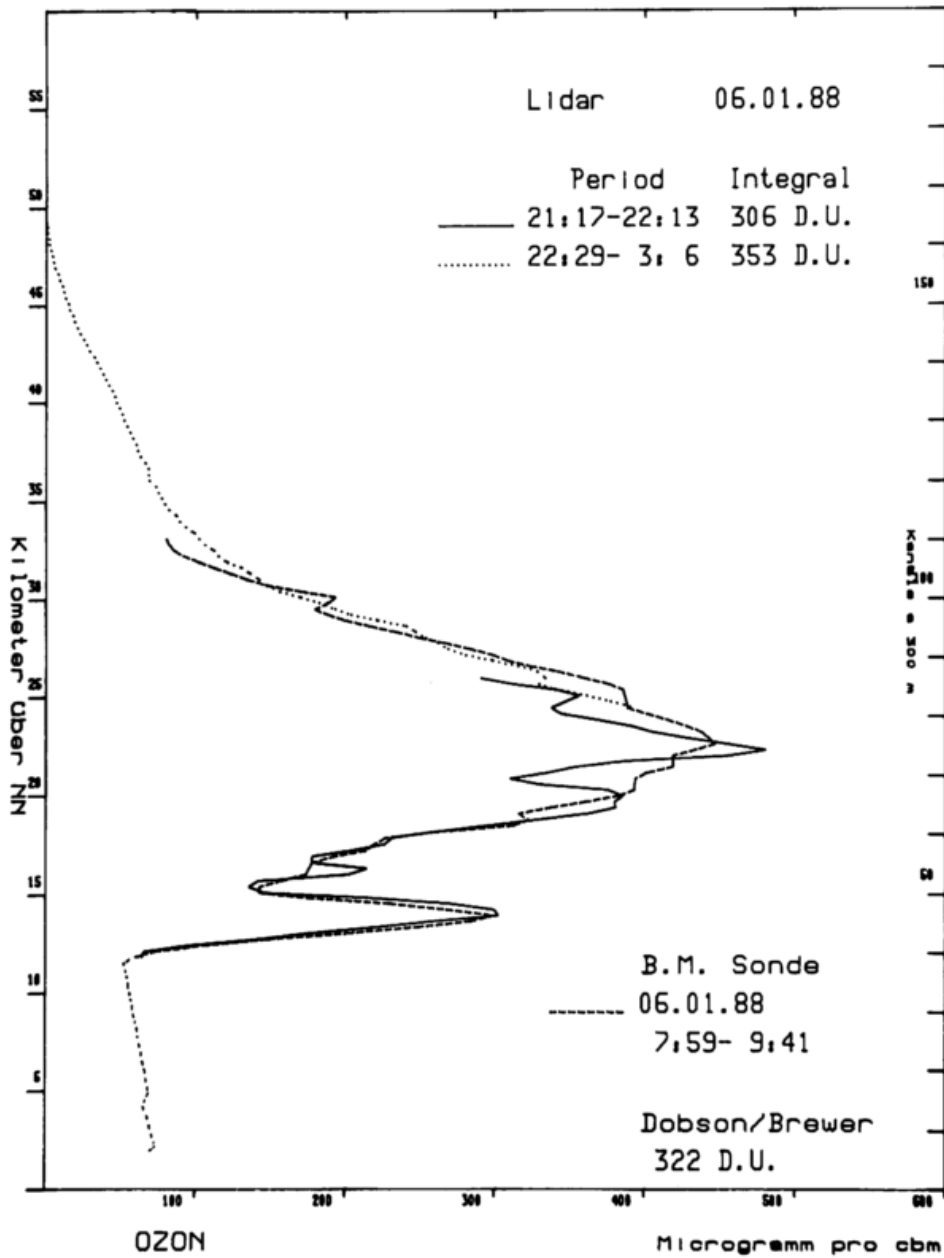


Abbildung 18: Ozonprofile vom 5./6. Januar 1988.

## 7.2 Vergleich Lidar - Spektrophotometer

Eine weitere Methode, die Güte der Lidarmessung zu verifizieren, ist der Vergleich mit der Totalozonmessung. Die Totalozonmessungen werden mit hochgenauen Spektrophotometern, deren Meßfehler bei 1 - 2 % liegt, durchgeführt. Die beiden Spektrophotometer, der sogenannte "Dobson" und der "Brewer", messen nur bei Sonnenschein und damit ebenfalls nicht zeitgleich mit der Lidarmessung. Außerdem muß, um aus der Lidarmessung einen vergleichbaren Totalozonwert berechnen zu können, zuerst der fehlende Teil des Profils ergänzt werden. Es handelt sich dabei meist nur um das troposphärische Ozon, das aus saisonalen Mittelprofilen der Hohenpeißenberger Sondierungsdaten stammt. Bis auf diesen Anteil, der maximal 10 - 15 % des Gesamt Ozons ( $\hat{=}$  Totalozon) ausmacht, sind die als "Integral" in den Abbildungen bezeichneten und für den folgenden Vergleich herangezogenen Werte allein und ohne jede Korrektur aus den Lidarmessungen berechnet.

Wird die relative Differenz aller Integralwerte (65 Messungen von Oktober 1987 - Oktober 1988) zur zeitlich nächstgelegenen Dobson- bzw. Brewer-Messung graphisch dargestellt (Abb. 19), ist auch hier eine außerordentlich hohe Übereinstimmung erkennbar. Obwohl, wie oben bereits angesprochen, auch hier meistens mehrere Stunden Zeitdifferenz zwischen Lidar- und Spektrophotometermessung lagen und - wie im nächsten Abschnitt zu sehen - auch beim Gesamt ozon rasche und markante Änderungen stattfinden können.

Die mittlere relative Abweichung des Lidars zum Dobson beträgt lediglich 0,41 %, was zeigt, daß die Abweichungen nicht systematisch, sondern rein zufälliger Natur sind. Zum Vergleich sei die relativ hohe Abweichung der Brewer/Mast-Sonde zum Dobson genannt: Sie beträgt im zehnjährigen Mittel 9,7 %, weswegen die Sondenaufstiege auch "dobsonkorrigiert" werden (CLAUDE, HARTMANN GRUBER, KÖHLER 1987).

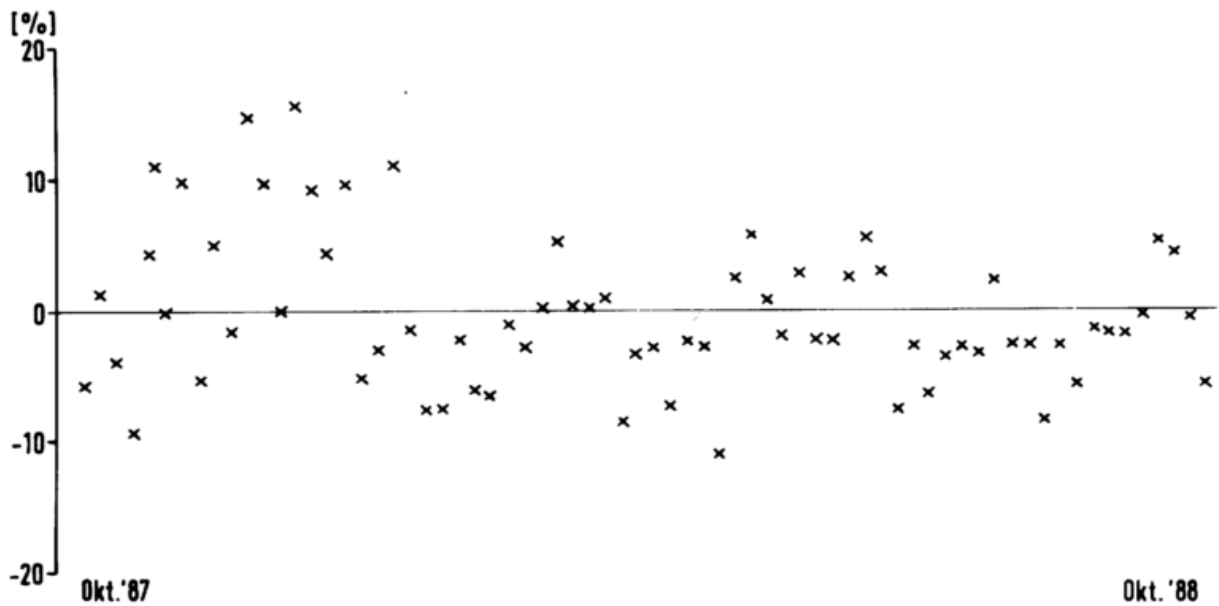


Abbildung 19: Relative Abweichung zwischen Lidar und Dobson-Spektrophotometer, Oktober 1987 - Oktober 1988.

### 7.3 Vergleich Lidar - Brewer/Mast-Sonde

Der direkte Vergleich von einzelnen Ozonprofilen, die mit Lidar bzw. mit der Brewer/Mast-Sonde gemessen werden, fällt außerordentlich zufriedenstellend aus. Dies ist insofern besonders bemerkenswert, da mehrere grundlegende Unterschiede zwischen beiden Systemen bestehen, die durchaus Einfluß auf das Ozonprofil haben können:

Da die Sonde mit der Luftströmung driftet, kann sie auch weit- aus mehr als 100 km verfrachtet werden. Dadurch ist das gemessene Ozonprofil nicht unbedingt repräsentativ für die Ozonverteilung über der Station. Der Ballonaufstieg dauert ca. 90 Minuten, in denen jedoch keine Daten akkumuliert werden, sondern eigentlich "Punktmessungen" entlang der Aufstiegsroute durchgeführt werden, die jedoch aufgrund der Trägheit der Sonde Extreme in der Vertikalverteilung nur unvollständig wiedergeben und

zu einer gewissen Glättung des Profils führen (CLAUDE et al. 1987). Darüber hinaus weist die Sonde einige systematische Fehler auf, die durch internationale Ozonsondenvergleiche bekannt sind (ATTMANNSPACHER und DÜTSCH 1981, HILSEN RATH et al. 1986).

Beim Lidar muß aufgrund der statistischen Verteilung der empfangenen Photonen ebenfalls geglättet werden. Die Ortsauflösung liegt in großen Höhen nur noch bei einigen Kilometern (s. Abschnitt 6). Für ein Ozonprofil bis in Höhen über 40 km muß einige Stunden lang gemessen werden.

Weil das Lidar nur in klaren Nächten eingesetzt werden kann, ist es fraglich, inwieweit diese Messungen aufgrund des "Auswahleffektes" zu Monats- oder Jahresmitteln zusammengefaßt werden können, die dann auch für diesen Zeitraum repräsentativ sind. Um diese Frage zu beantworten, werden auch wieder Vergleiche zu Sondierungswerten angestellt. Diese wurden, wie die Lidarwerte auch, in sogenannte reduzierte Schichtdicken, die in der Einheit Dobson Units [D.U.] angegeben werden, umgerechnet und auf Umkehrschichten bezogen. Dadurch wird eine einheitliche und für Vergleichszwecke geeignete Datenbasis erreicht. Die hier untersuchten Überlappungsbereiche sind Schicht 5 (23,7 - 28,2 km) und Schicht 6 (28,2 - 33,0 km), wobei alle zur Verfügung stehenden Ozonprofile aus dem Zeitraum Oktober 1987 - Oktober 1988 herangezogen wurden.

In Tabelle 2 sind sowohl die Lidar- als auch die Sondenwerte als Monatsmittel in den einzelnen Schichten angegeben. Sie stimmen in manchen Fällen gut, in anderen wiederum nur wenig überein. Werden die relativen Abweichungen dieser Werte (Lidar zur Sonde) graphisch dargestellt (Abb. 20), so zeigt sich insgesamt eine recht gute Übereinstimmung. Die meisten Monatsmittelwerte weichen um weniger als 5 % voneinander ab. Dabei ist zu bedenken, daß die einzelnen Sondierungswerte in den jeweiligen Monaten mitunter stark schwanken, was sich auch in der Standardabweichung widerspiegelt.

**Tabelle 2:** Monatsmittelwerte der relativen Schichtdicken in Dobson Units [D.U.] in den Umkehrschichten 5 - 9 aus den Lidar- und Sondierungsdaten für den Zeitraum Oktober 1987 - Oktober 1988.

| Monat                     | 10/87 | 11/87 | 12/87 | 1/88 | 2/88 | 3/88 | 4/88  | 5/88 | 6/88  | 7/88 | 8/88 | 9/88 | 10/88 |
|---------------------------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|------|-------|------|------|------|-------|
| <b>Lidar</b>              |       |       |       |      |      |      |       |      |       |      |      |      |       |
| Umkehrschicht<br>—48,3 km | 2,1   | 3,4   | 2,3   | 3,2  | 3,5  | 3,8  | [3,5] | 2,7  | [2,1] | 4,2  | 4,5  | 4,7  | 3,4   |
| —42,6 km                  | 8,9   | 7,4   | 7,3   | 7,9  | 8,4  | 9,6  | 9,1   | 9,1  | 9,3   | 9,7  | 9,9  | 9,6  | 8,5   |
| —37,8 km                  | 20,1  | 16,9  | 16,0  | 16,0 | 18,8 | 20,6 | 21,5  | 21,1 | 22,2  | 22,7 | 22,4 | 21,8 | 17,9  |
| —33,0 km                  | 40,8  | 31,4  | 28,7  | 30,5 | 38,2 | 42,7 | 41,6  | 45,5 | 45,9  | 47,0 | 45,7 | 42,4 | 32,3  |
| —28,2 km                  | 62,3  | 54,3  | 47,2  | 59,6 | 57,6 | 61,4 | 63,7  | 65,4 | 65,7  | 65,3 | 64,0 | 57,7 | 52,3  |
| —23,7 km                  |       |       |       |      |      |      |       |      |       |      |      |      |       |
| <b>Brewer/Mast-Sonde</b>  |       |       |       |      |      |      |       |      |       |      |      |      |       |
| —33,0 km                  | 41,9  | 31,4  | 28,9  | 30,2 | 31,9 | 37,5 | 38,2  | 43,1 | 46,6  | 46,3 | 47,2 | 41,9 | 35,8  |
| —28,2 km                  | 63,2  | 62,3  | 61,1  | 62,4 | 59,9 | 57,9 | 63,5  | 64,4 | 68,7  | 67,6 | 66,7 | 56,4 | 58,6  |
| —23,7 km                  |       |       |       |      |      |      |       |      |       |      |      |      |       |

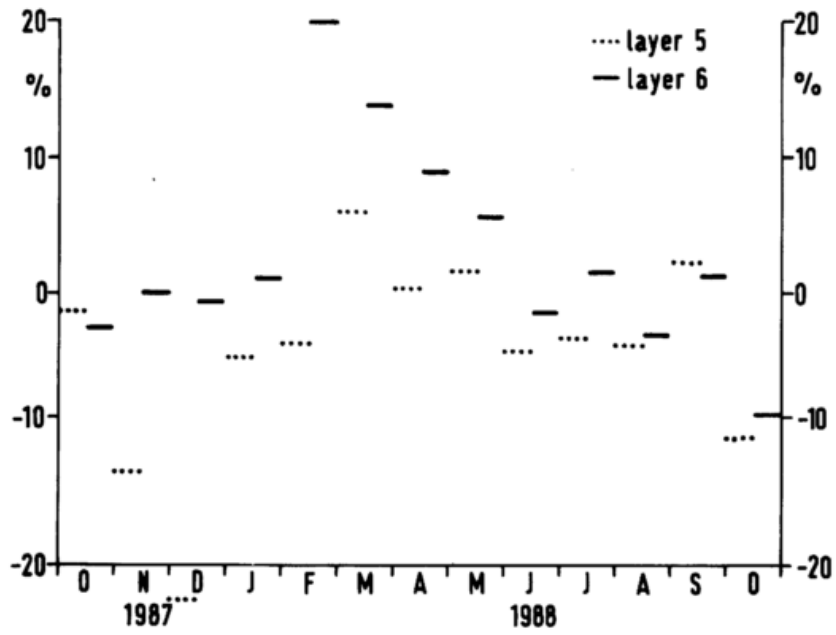


Abbildung 20: Relative Abweichung der Monatsmittel der relativen Schichtdicken (Lidar - Brewer/Mast-Sonde) für Umkehrschicht 5 und 6.

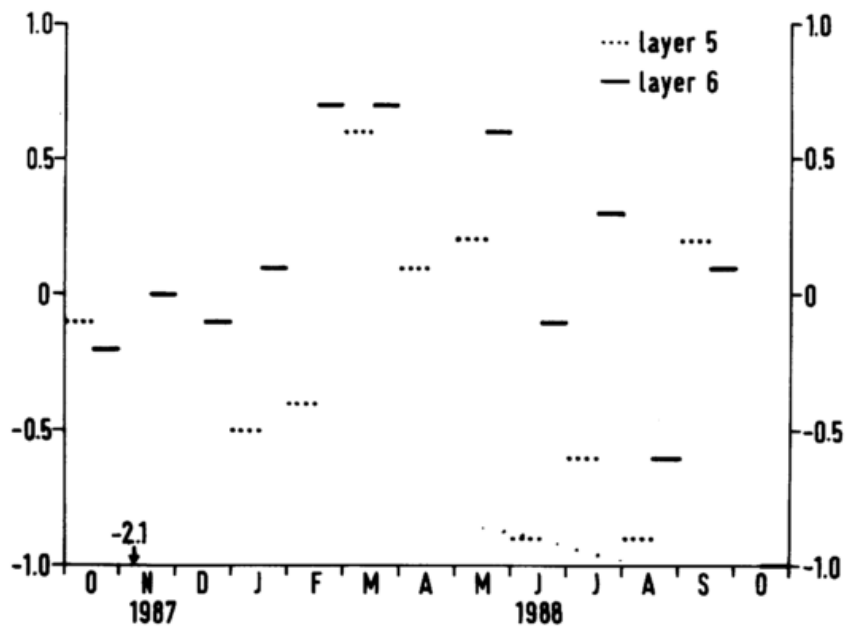


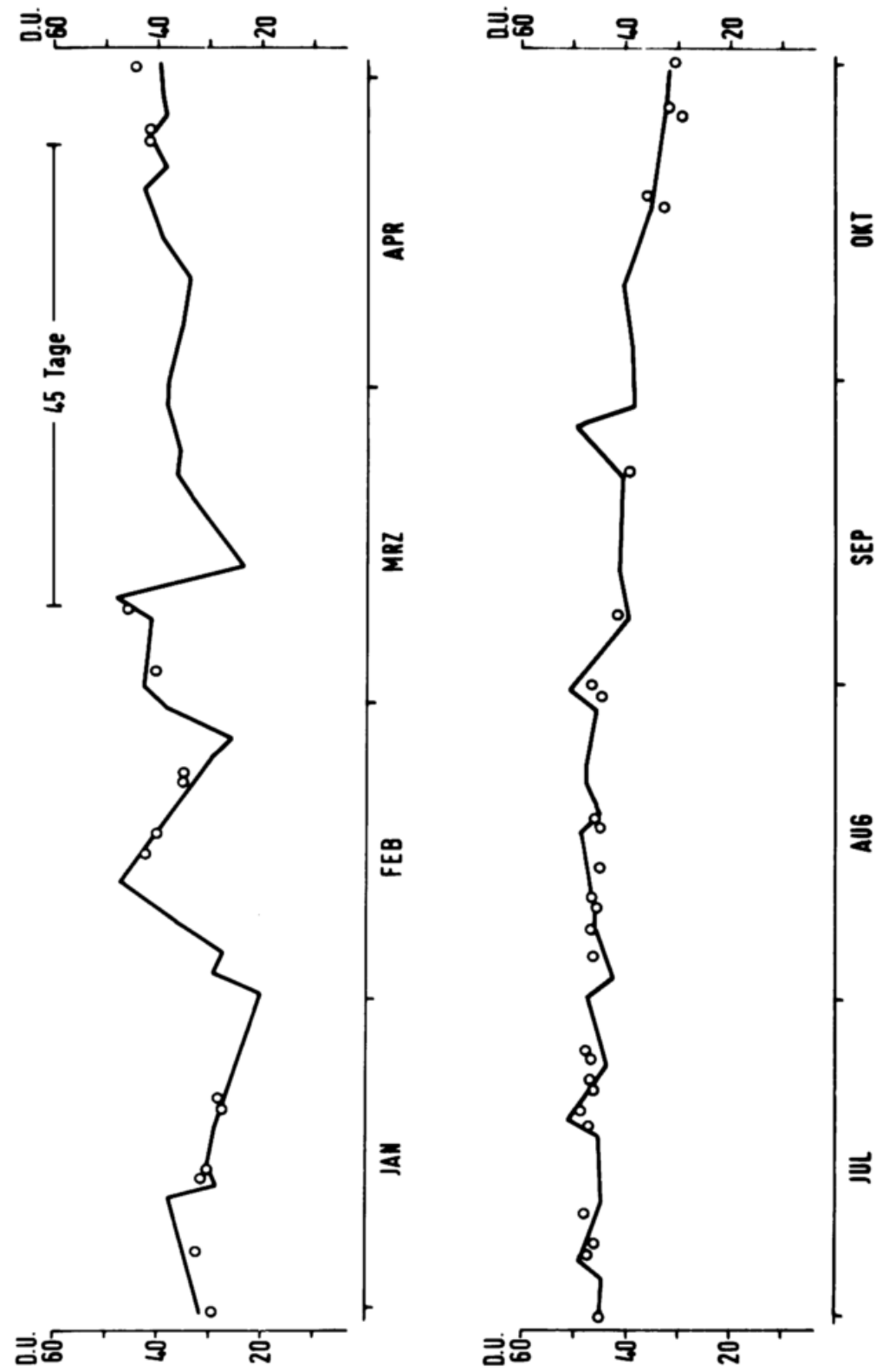
Abbildung 21: Mit dem Standardfehler der Sonde normierte absolute Abweichung der entsprechenden Monatsmittel.

Werden die Abweichungen der Monatsmittel mit der jeweiligen Standardabweichung der Sondierungsdaten normiert, indem die Differenz zwischen Lidar- und Sonden-Monatsmittelwerten durch die Standardabweichung des Sondenmittels im betreffenden Monat geteilt wird (Abb. 21), dann zeigt sich: Fast alle Monatsmittelwerte des Lidars liegen innerhalb der Grenzen des Standardfehlers der Sonde. Auch der Vergleich der aus diesen Daten berechneten Jahresmittelwerte fällt äußerst günstig aus. Hier liegt die Abweichung bei nur noch 1 %.

Das bedeutet: Monats- oder Jahresmittel aus der Lidarmessung können im allgemeinen durchaus als repräsentativ angesehen werden.

Treten jedoch im Ozongang starke Schwankungen auf und sind die Lidarmessungen wegen der Ungleichverteilung klarer Nächte zeitlich ungünstig plaziert, kann es zu größeren Abweichungen zwischen den Monatsmittelwerten kommen.

Unmittelbar klar wird dieser Zusammenhang anhand zweier Beispiele in Abbildung 22: Dargestellt ist der Verlauf der reduzierten Schichtdicke (in D.U.) in Umkehrschicht 6 für die Zeiträume Januar bis April und Juli bis Oktober 1988. Die durchgezogene Linie verbindet die einzelnen Werte aus den Ballonsondierungen, die Lidarwerte sind durch Kreise markiert. Sie fügen sich außerordentlich gut in den durch die Sondierungen vorgegebenen Kurvenverlauf ein. Erkennbar wird jedoch auch die zeitliche Ungleichverteilung der Lidarmessungen. So konnte von Mitte März bis Ende April wegen Schlechtwetter mit dem Lidar überhaupt nicht gemessen werden. Zusätzlich traten in dieser Periode auch starke Änderungen im Ozonverlauf auf, wodurch es zwangsläufig zu einer größeren Abweichung der entsprechenden Monatsmittelwerte kommen muß. Im Sommer und Frühherbst hingegen stellte sich der Ozonverlauf gleichförmiger dar. Zusammen mit der höheren und gleichmäßigeren Meßdichte (Juli/August) ergibt sich eine bessere Übereinstimmung der Monatsmittelwerte.



**Abbildung 22:** Verlauf der reduzierten Schichtdicke in D.U. in Umkehrschicht 6 für die beiden Zeiträume Januar bis April und Juli bis Oktober 1988.

#### 7.4 Lang- und kurzfristige Ozonänderungen

In Abbildung 23 ist der Jahresverlauf der Monatsmittel für den Zeitraum des operationellen Lidarbetriebes für die Umkehrschichten 5 - 9 dargestellt. Die reduzierte Schichtdicke ist in Dobson Units auf der Ordinate, von oben nach unten zunehmend, aufgetragen (d. h. Maxima in den Kurven entsprechen Minima in der Ozonverteilung und umgekehrt!).

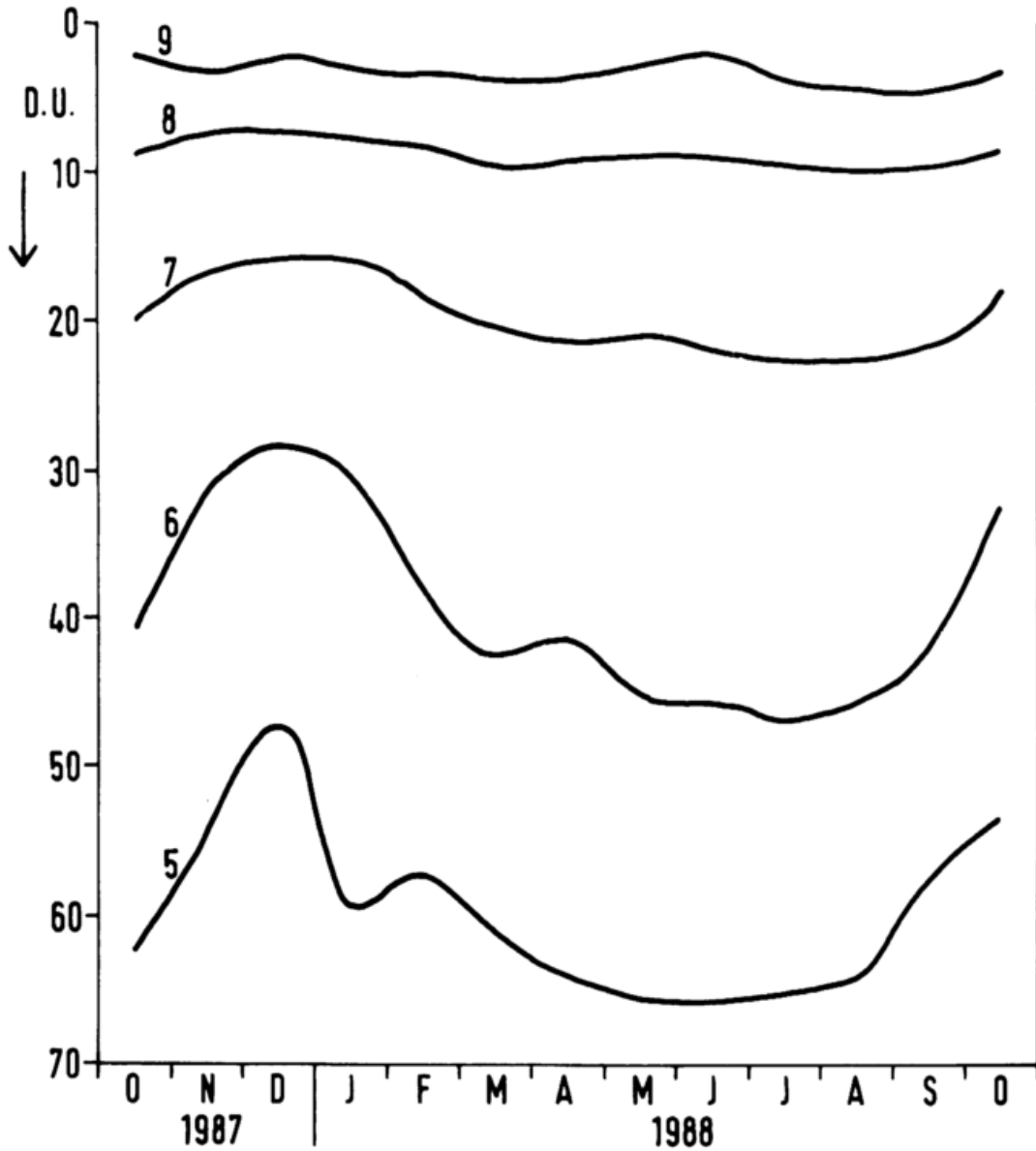
Zunächst fällt auf, daß sich die nur 13 Monatsmittel pro Umkehrschicht zwanglos zu plausiblen und stetigen Kurvenzügen verbinden lassen. Dies zeichnete sich bereits in der vorhergehenden Abbildung 22 anhand der Einzelwerte ab.

In den Umkehrschichten 5 und 6 prägt sich der Jahresgang am deutlichsten aus. Wie schon aus den langjährigen Sondierungsreihen bekannt (WEGE, CLAUDE, HARTMANNSGRUBER 1988), zeigt sich auch hier der typische Jahresgang mit einem Maximum im Sommer und dem Minimum im Winter. Dabei ist der Abfall zum Winter steiler als der Anstieg im Sommer. Mit zunehmender Höhe (Schicht 7) verflacht der Jahresgang zusehends; er ist in den Schichten 8 und 9 nicht mehr erkennbar. Hier traten auch die kleinsten relativen Änderungen bei gleichzeitig geringstem Ozongehalt auf.

Die in der Einleitung aufgeworfene Frage nach langfristigen Änderungen in diesem Höhenbereich kann nach so kurzer Zeit der operationellen Messung natürlich noch nicht diskutiert werden.

Kurzfristige Änderungen in der Struktur der vertikalen Ozonverteilung konnten ohne Lidar bisher kaum untersucht werden, wenn diese Änderungen nicht im gleichen zeitlichen Maßstab wie die Aufstiegsfrequenz der Ballonsonden lagen (ATTMANNSPACHER et al. 1984). Erstmals ermöglicht die Lidartechnik die Untersuchung auch rascherer Strukturänderungen (MEGIE und PELON 1983). In Höhen unter 30 km genügen dabei Integrationszeiten von einigen

Minuten, um hinreichend genaue Ozonprofile messen zu können (CLAUDE und WEGE 1988).



**Abbildung 23:** Jahresverlauf des Ozons in den Umkehrschichten 5 - 9. Die Monatsmittel sind als reduzierte Schichtdicke in D.U. aus den Lidarmessungen berechnet (1 D.U.  $\hat{=}$  0,01 mm).

Solche Untersuchungen zeigen, daß gerade im Winter und Frühjahr innerhalb nur einer Nacht bemerkenswerte Änderungen im Ozonprofil auftreten können. Die stärksten Änderungen treten dabei im Bereich des Ozonhauptmaximums bzw. darunter auf. In der Region also, in der die vertikale Ozonverteilung hauptsächlich von dynamischen Prozessen bestimmt wird.

Die Ausgangssituation eines solchen Falles zeigt Abbildung 24. Sie ist durch das Vorhandensein eines ausgeprägten sekundären Ozonmaximums gekennzeichnet, das im Spätwinter und Frühjahr gehäuft vorkommt.

Dieses Sekundärmaximum in ca. 12 km Höhe war während der Lidarmessung, am Morgen des 22. Februar 1988, noch eingipflig. Etwa 2 Stunden später, bei der Ballonsondierung, erstreckte es sich über einen größeren Höhenbereich und war in mehrere Gipfel zerfasert.

Diese Strukturveränderung setzte sich weiter fort, wie in einer Sequenz von einstündigen Lidarmessungen in der Folgenacht (22./23.02.) von 20.00 Uhr bis 6.00 Uhr MEZ beobachtet wurde (Abb. 25).

Bis zum Abend des 22. (L3) hatte sich das markante Ozonminimum in ca. 15 km Höhe nahezu vollständig aufgefüllt, so daß gar keine Unterscheidung in Haupt- und Sekundärmaximum mehr möglich war. Zwischen 13 und 24 km Höhe wechseln mehrere, nur mehr schwach ausgeprägte Maxima und Minima miteinander ab. Erst im Laufe der Nacht (L5.1 - 5.5) prägte sich wieder ein markanteres Maximum - diesmal in 18 km Höhe - aus. Das zeitliche und räumliche Wandern dieser Strukturen und auch deren Intensitätsänderung lassen sich anhand dieser Sequenz von Lidarmessungen außerordentlich gut verfolgen.

Als weiteres Beispiel einer kurzfristigen und intensiven Änderung, diesmal fast ausschließlich im Ozonmaximum selbst, gelten

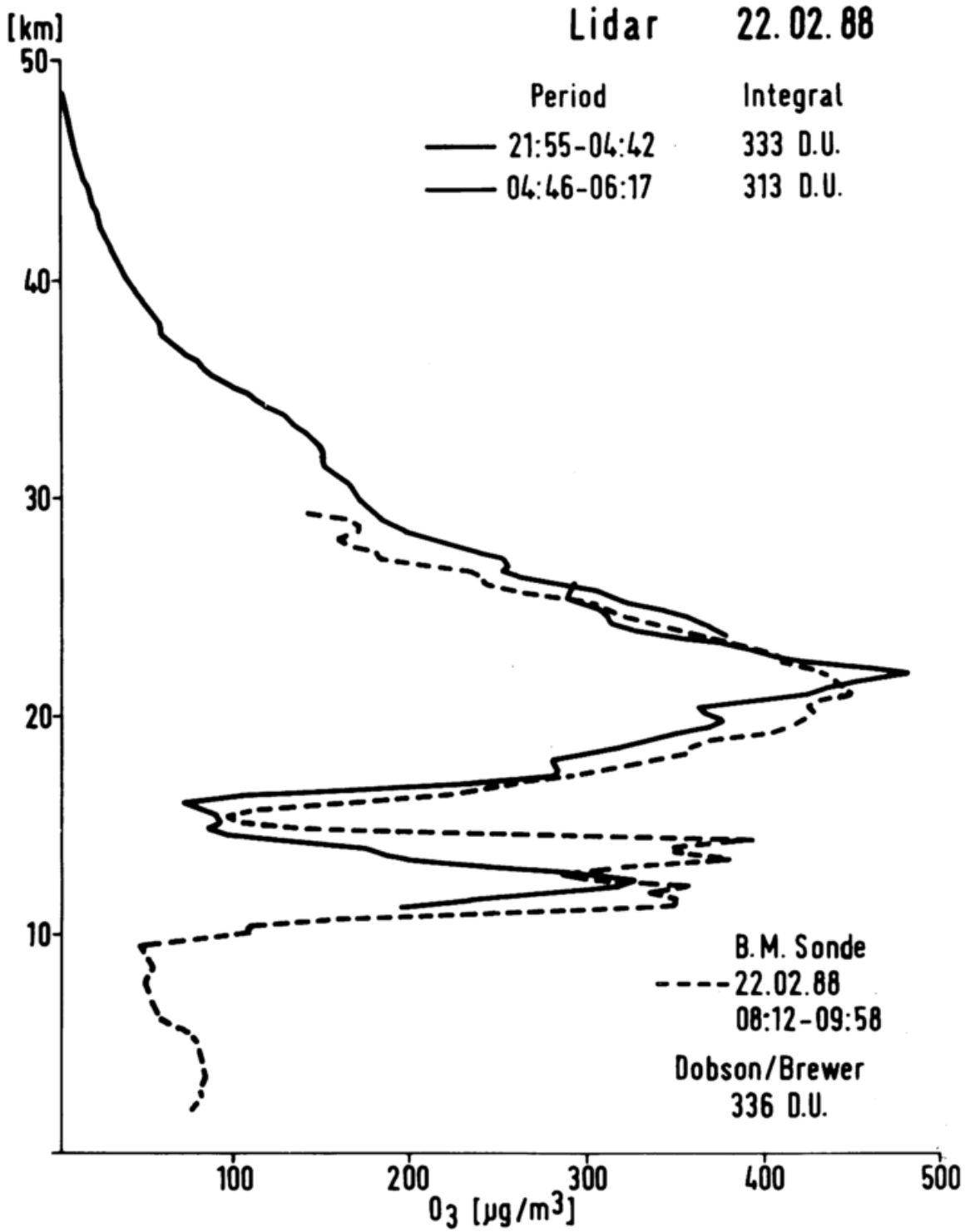


Abbildung 24: Ozonprofile vom 21./22. Februar 1988.

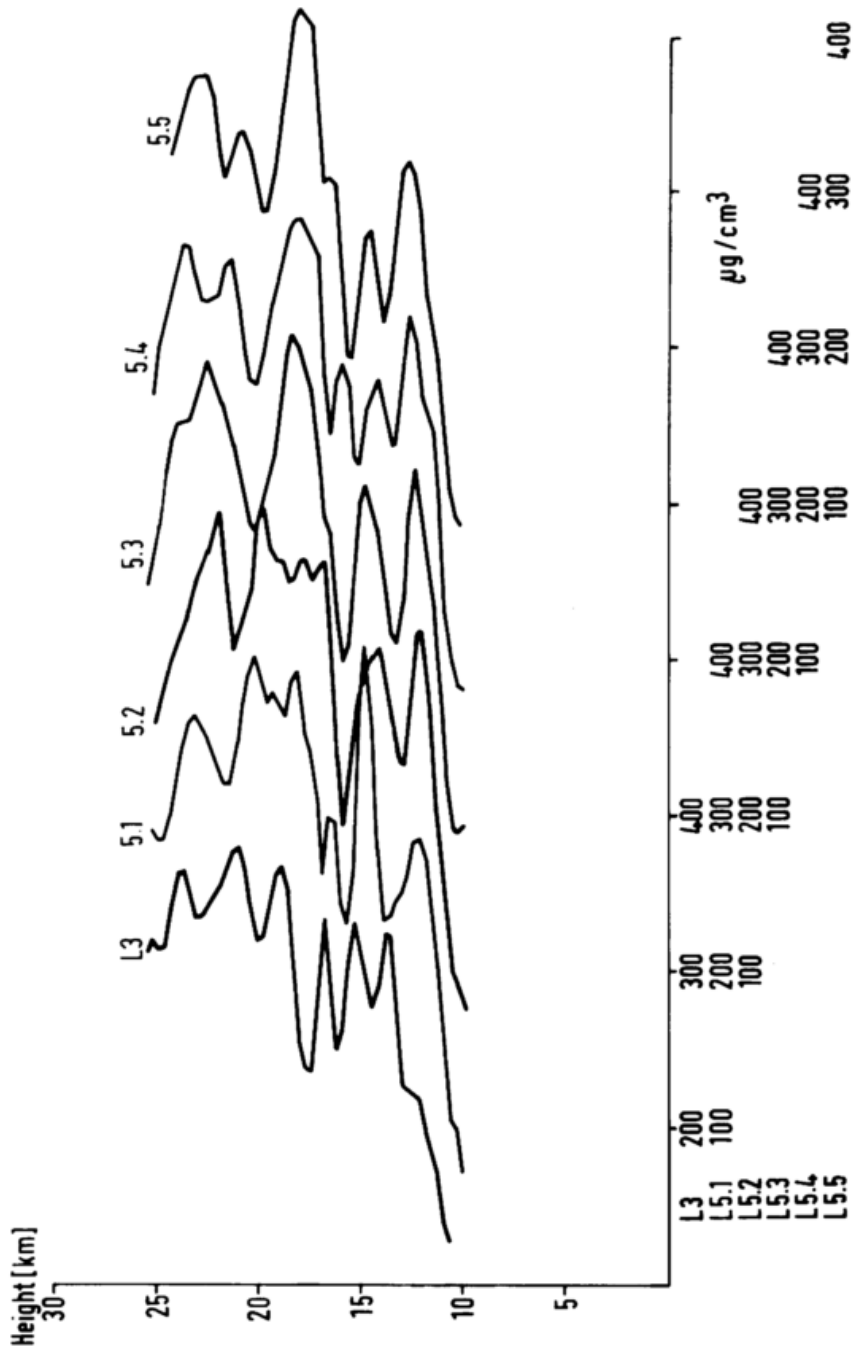
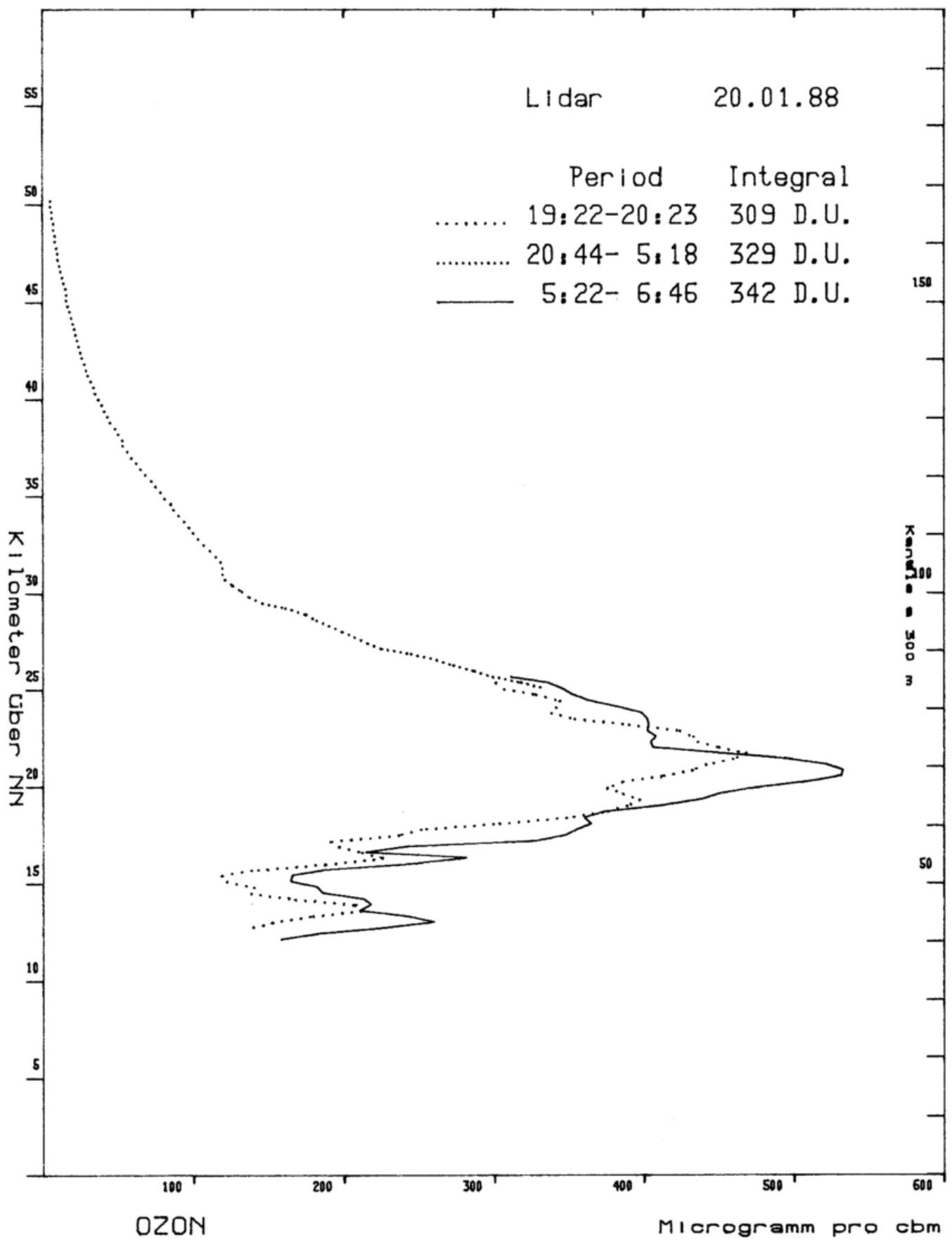


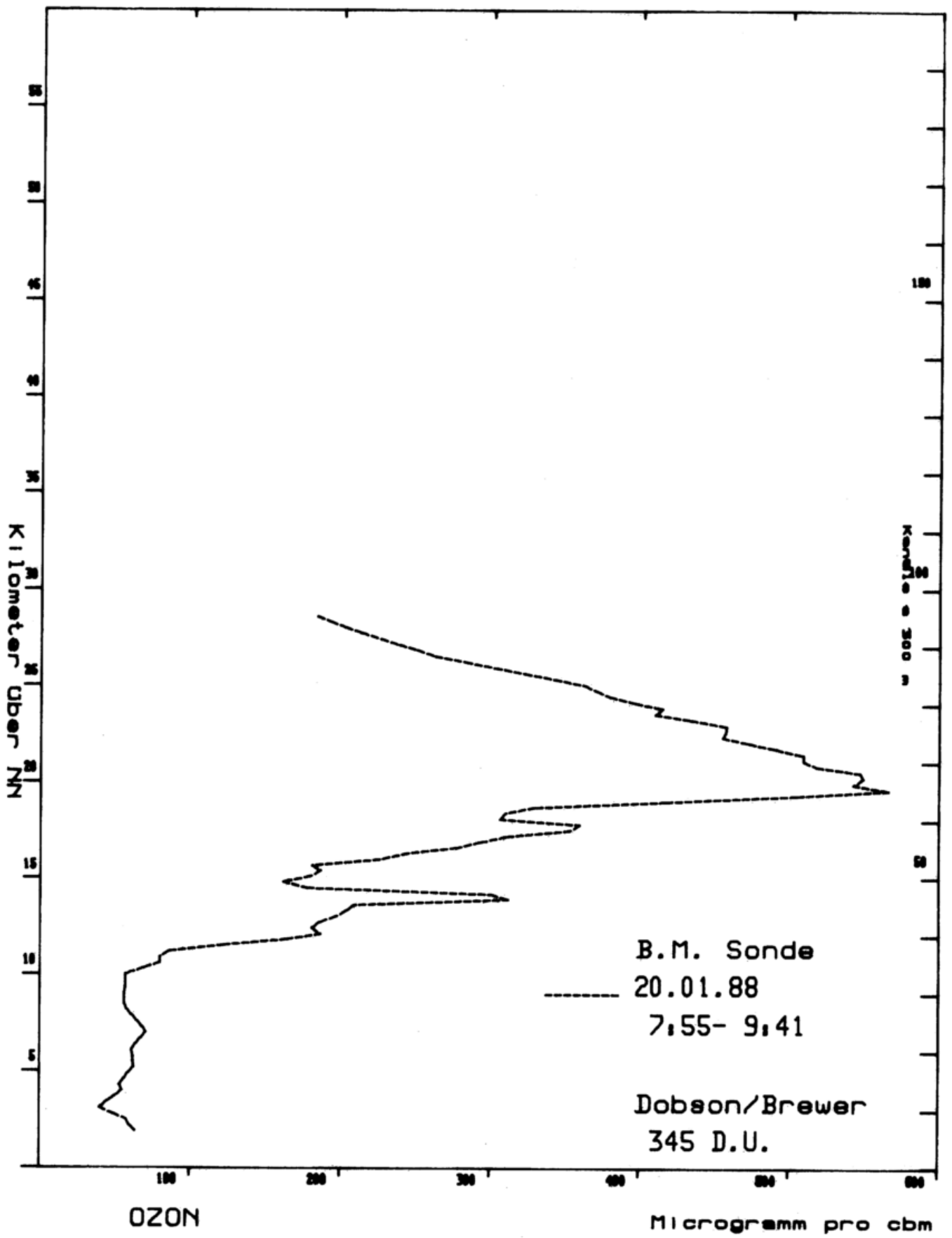
Abbildung 25: Sequenz von ca. einstündigen Lidarprofilen vom 22./23. Februar 1988.



Met. Obs. HP.

23. 6.89

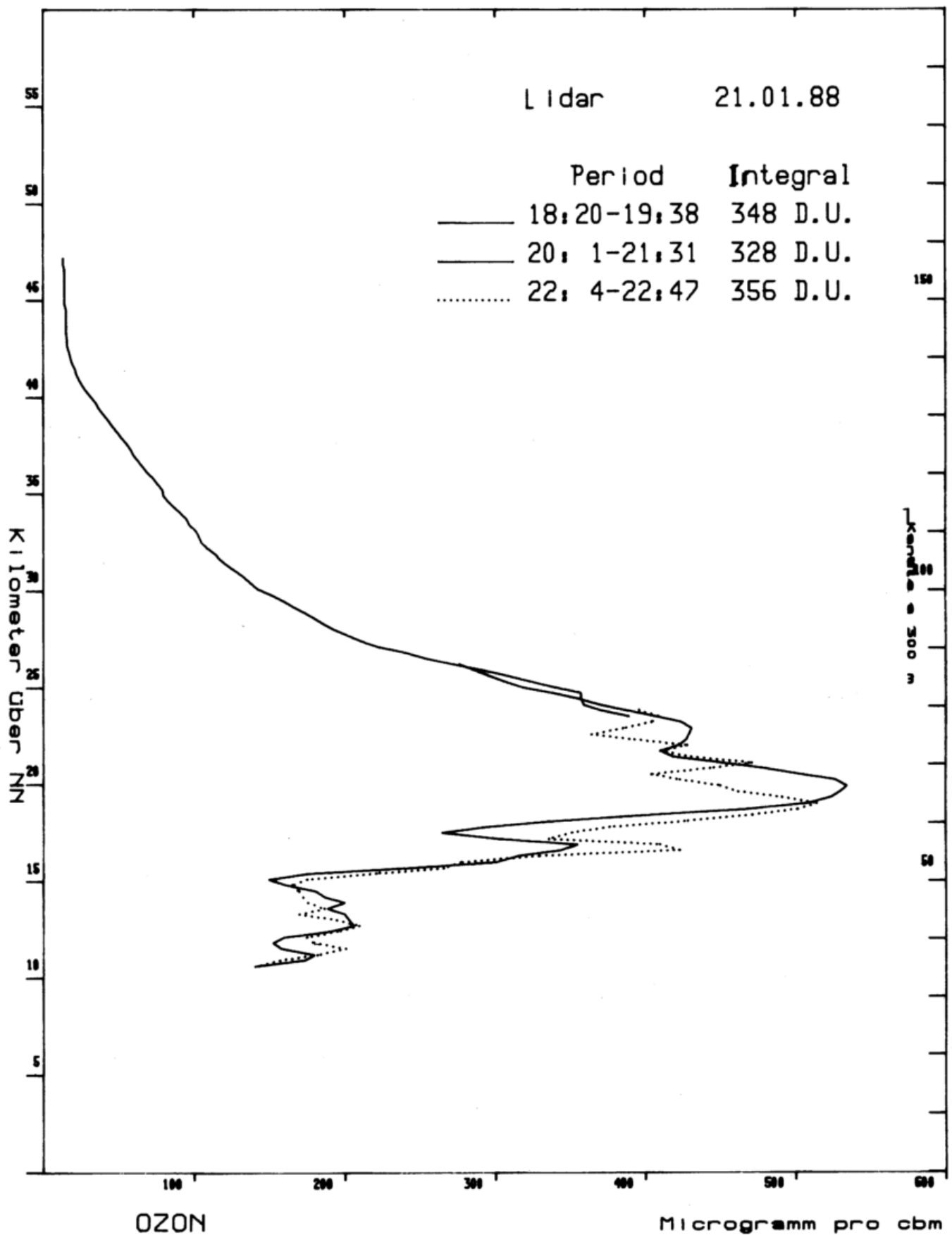
Abbildung 26 a



Met. Obs. HP.

23. 6.89

Abbildung 26 b



23. 6.89

Abbildung 26 c

**Abbildung 26 a - c:** (links) Abfolge von Ozonprofilen (Lidar und Brewer/Mast-Sonde), den Auf- und Abbau eines markanten Ozonmaximums zeigend. Erste Messung: 19.01.1988, 19.22 Uhr - 20.23 Uhr; letzte Messung: 20.01.1988, 22.04 Uhr - 22.47 Uhr MEZ.

die Messungen vom 19./20. Januar 1988 (Abb. 26 a). Sie begannen mit einer Lidarmessung am Abend des 19.01. von 19.22 Uhr bis 20.23 Uhr MEZ im Höhenbereich 13 - 26 km. Nach der Messung im oberen Höhenbereich (25 - 50 km) wurde am Morgen des 20.01. die untere Messung wiederholt (5.22 Uhr bis 6.46 Uhr MEZ). Innerhalb dieser achtstündigen Zeitspanne hat sich das gesamte Ozonprofil zwischen 12 und 22 km zu höheren Werten hin verschoben, wobei in diesem Fall die Grundstruktur jedoch erhalten blieb. Die Partialdichte im Maximum erhöhte sich von  $470 \mu\text{g}/\text{m}^3$  auf  $530 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , entsprechend 12 %. Darüber hinaus scheint sich das ganze Profil um etwa 1 - 2 km abwärts verschoben zu haben.

Eine Bestätigung und Fortsetzung dieser Vorgänge zeigt die Ballonsondierung 1 - 2 Stunden später (Abb. 26 b): Das Ozonmaximum ist in seiner Position um weitere 2 km abgesunken, wobei die Partialdichte nochmals um 7,5 % auf  $570 \mu\text{g}/\text{m}^3$  angestiegen ist. Dies ist ein ungewöhnlich hoher Wert.

Am folgenden Abend, d. h. 8 1/2 Stunden später, konnte mittels Lidar ein in der Struktur recht ähnliches Profil mit noch immer  $550 \mu\text{g}/\text{m}^3$  im Maximum gemessen werden (Abb. 26 c). Die abschließende Messung in diesem Höhenbereich fand nahezu 3 Stunden später, von 22.04 - 22.47 MEZ, statt und zeigt eine erneute Abwärtsverlagerung des Hauptmaximums bei weiter zurückgehender Partialdichte.

Aufkommende Bewölkung verhinderte die Fortsetzung dieser interessanten Messungen.

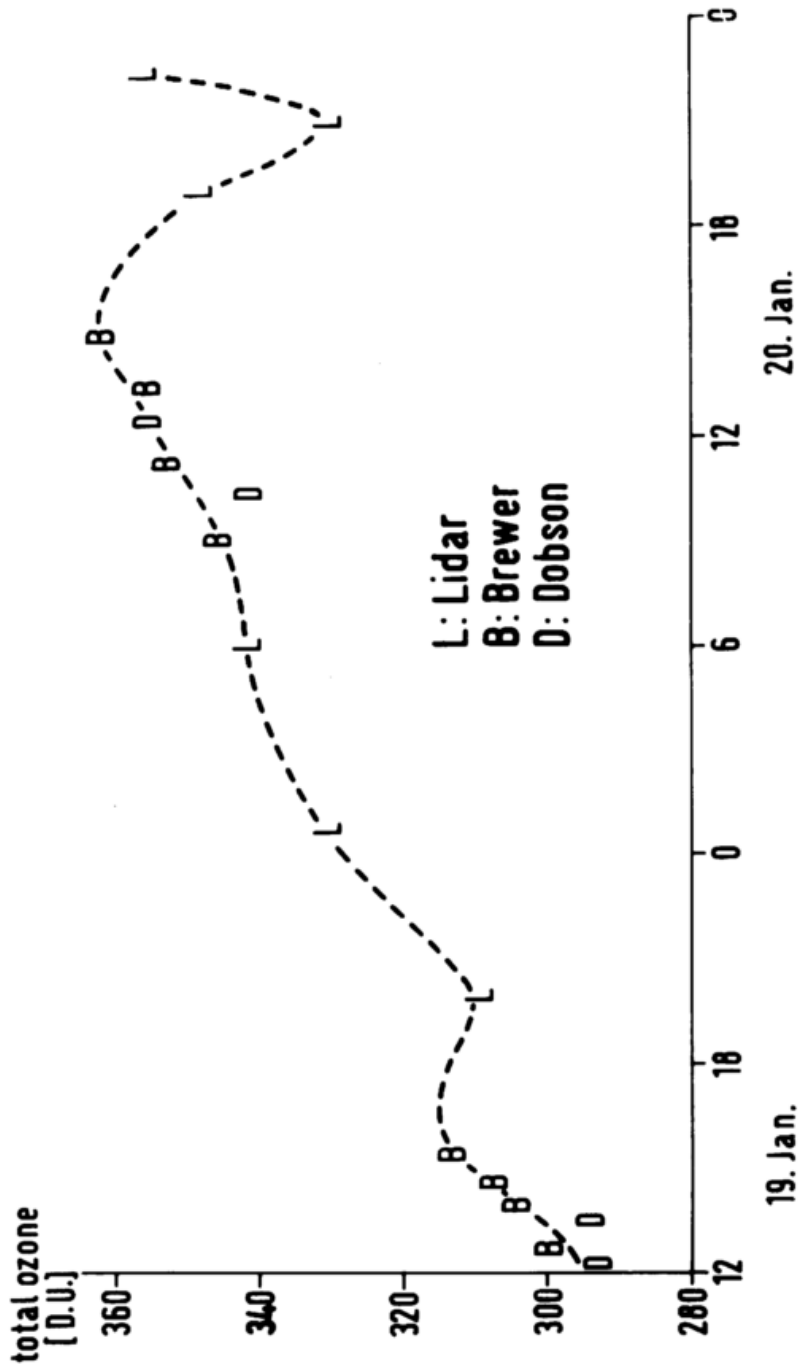


Abbildung 27: Zeitlicher Verlauf der Gesamtozonwerte im Zeitraum 19./20. Januar 1988.

Auch im zeitlichen Verlauf der korrespondierenden Gesamtozonwerte (Abb. 27) spiegelt sich der kontinuierliche Auf- und Abbau dieses Ozonmaximums wider: Unabhängig davon, ob mit Brewer- oder Dobson-Spektrophotometer gemessen oder aus dem Lidarprofil berechnet, fügen sich diese Werte hervorragend aneinander. Der Anstieg der Gesamtozonwerte vom 19. Januar mittags zum 20. Januar nachmittags, also innerhalb 27 Stunden, beträgt mehr als 20 %.



## 8 Literatur

ATTMANNSPACHER, W. und H.U. DÜTSCH, 1981: 2nd International Ozone Sonde Intercomparison at the Observatory Hohenpeissenberg, 5 - 20 April 1978. Ber. Dt. Wetterd. Nr. 157.

ATTMANNSPACHER, W., R. HARTMANNSGRUBER, P. LANG, 1984: Langzeittendenzen des Ozons der Atmosphäre aufgrund der 1967 begonnenen Ozonmeßreihen am Meteorologischen Observatorium Hohenpeissenberg. Meteorol. Rdsch. 37, S. 193 - 199.

BRASSEUR, G. und A. DeRUDDER, 1987: The potential impact on atmospheric ozone and temperature of increasing trace gas concentrations. J. Geophys. Res., Vol. 92, S. 10903 - 10920.

BRASSEUR, G. und P.C. SIMON, 1988: Changes in stratospheric ozone: Observations and theories. Aeronomica Acta No. 334.

CIRA, 1972: Akademie-Verlag, Berlin.

CLAUDE, H., R. HARTMANNSGRUBER, U. KÖHLER, 1987: Measurements of atmospheric ozone using the Brewer/Mast sonde. WMO Global Research and Monitoring Project, Report No. 17.

CLAUDE, H. und K. WEGE, 1988: The Hohenpeissenberg Lidar: First results and intercomparison with Brewer/Mast soundings. Proceedings of the International Ozone Symposium 1988. A. Deepak Publishing, Hampton, Virginia (im Druck).

DÜTSCH, H.U., 1986: Die Geschichte der atmosphärischen Ozonforschung. Promet 4/86, S. 3 - 6.

- GEH, B., 1987: Aufbau einer automatischen Lidar-Apparatur zur Messung der stratosphärischen Ozonkonzentration. Diplomarbeit, Universität München.
- GEH, B., 1988: Dokumentation zu den Auswertungsprogrammen. Werkvertragsarbeit, Deutscher Wetterdienst MOHp.
- HILSEN RATH, E., W. ATTMANN SPACHER, R.A. BARNES, A. BASS, E. EVANS, R. HAGEMEYER, W.D. KOMHYR, K. MAUERSPERGER, J. MENTALL, M. PROFFITT, D. ROBBINS, S. TAYLOR, A. TORRES, E. WEINSTOCK, 1986: Results from the Balloon Ozone Intercomparison Campaign (BOIC). J. Geophys. Res., Vol. 91, No. D12, S. 13137 - 13152.
- KRUEGER, A.J., 1987: Raketensonden. Promet 1/87, S. 5 - 10.
- McPETERS, R.D. und A.M. BASS, 1982: Geophys. Res. Lett. 11/76.
- MEGIE, G. und J. PELON, 1983: Measurements of the ozone vertical distribution (0 - 25 km): comparison of various instruments. Planetary Space Sci. 39, 7.
- PELON, J. und G. MEGIE, 1982: Ozone monitoring in the troposphere and lower stratosphere: Evaluation and operation of a ground-based lidar station. J. Geophys. Res., Vol. 87, S. 4947.
- UCHINO, O. M. MAEDA, M. HIRONO, 1979: Applications of excimer lasers to laser radar observations of the upper atmosphere, J. Quart. Elec. QE-15.
- UCHINO, O., M. MAEDA, T. SHIBATA, M. HIRONO, M. FUJIWARA, 1980: Measurements of stratospheric vertical ozone distribution with a XeCl lidar. Applied Optics, Vol. 19, S. 4175 - 4181.

- WEGE, K. und H. CLAUDE, 1988: Vertical ozone profiles obtained by differential absorption lidar. WMO, Instr. and Observing Methods, Report No. 33, S. 187 - 192, TECO - 1988 Leipzig.
- WEGE, K., H. CLAUDE, R. HARTMANNSTRUBER, 1988: Several results from 20 years of ozone observations at Hohenpeissenberg. Proceedings of the International Ozone Symposium 1988. A. Deepak Publishing, Hampton, Virginia (im Druck).
- WERNER, J., K.W. ROTHE, H. WALTHER, 1983 a: Monitoring of the stratospheric ozone layer by laser radar. Applied Physics, B32, S. 113 - 118.
- WERNER, J., K.W. ROTHE, H. WALTHER, 1983 b: Lasermessungen des stratosphärischen Ozongürtels. Laser und Optoelektronik, 15. Jahrgang, S. 17 - 21.
- WERNER, J., 1984: Messung der stratosphärischen Ozonkonzentration mit Hilfe eines Laser-Radar-Systems. Dissertation, Universität München.
- WERNER, J., K.W. ROTHE, H. WALTHER, 1985: Measurement of the ozone profile up to 50 km altitude by differential absorption laser radar. In: "Atmospheric Ozone", Proc. Quadr. Ozone Symp., D. Reidel, S. 446 - 449.
- WUEBBLES, D.J., F.M. LUTHER, J.E. PENNER, 1983: Effect of coupled anthropogenic perturbations on stratospheric ozone. J. Geophys. Res., Vol. 88, S. 1449.



## 9 Danksagung

Unser Dank gilt Herrn Dr. W. Attmannspacher, der als vormaliger Leiter des Observatoriums vorausschauend die künftige Bedeutung von Lidarsondierungen erkannt und das Vorhaben initiiert hat.

Wir danken ferner Herrn A. Stögbauer als Werkstattleiter des MOHp für die äußerst exakt ausgeführten mechanischen Arbeiten an der Lidaranlage. Zum Schluß unser Dank an Frau Kopp für das Schreiben des Manuskripts sowie Herrn Steiner für die Erstellung der erforderlichen Zeichnungen.

Die Projektmittel wurden dankenswerterweise vom Bundesminister für Forschung und Technologie bereitgestellt.

