

## Kapitel 4

# Light Detection And Ranging

Die Arbeitsgruppe von Professor Wöste am Fachbereich Physik der FU Berlin hat bereits eine größere Anzahl von Diplom- und Doktorarbeiten aus dem Lidar-Bereich hervorgebracht, die allesamt detaillierte Beschreibungen diverser Lidar-Verfahren beinhalten z.B. [Rairoux, 1991], [Stein, 1994], [Wedekind, 1997]. An dieser Stelle soll deshalb auf eine ausführliche Beschreibung der Lidar-Technik im allgemeinen verzichtet werden. Neben einer kurzen Darstellung des Funktionsprinzips möchte ich aber eine ausführlichere Behandlung einiger wichtiger Details, wie z.B. der geometrischen Kompression als Grundlage des Designs einer Detektionsoptik geben. Nach einer kurzen Beschreibung der Lidar-Systeme der Meßstation Charité in Berlin-Mitte schließt sich im darauffolgenden Kapitel eine ausführliche Behandlung der Datenbearbeitung an, die die Inversion von Lidar-Signalen zur Berechnung der Aerosolstreuung, sowie die Bestimmung von Spurengaskonzentrationen mit der DIAL-Methode beinhaltet.

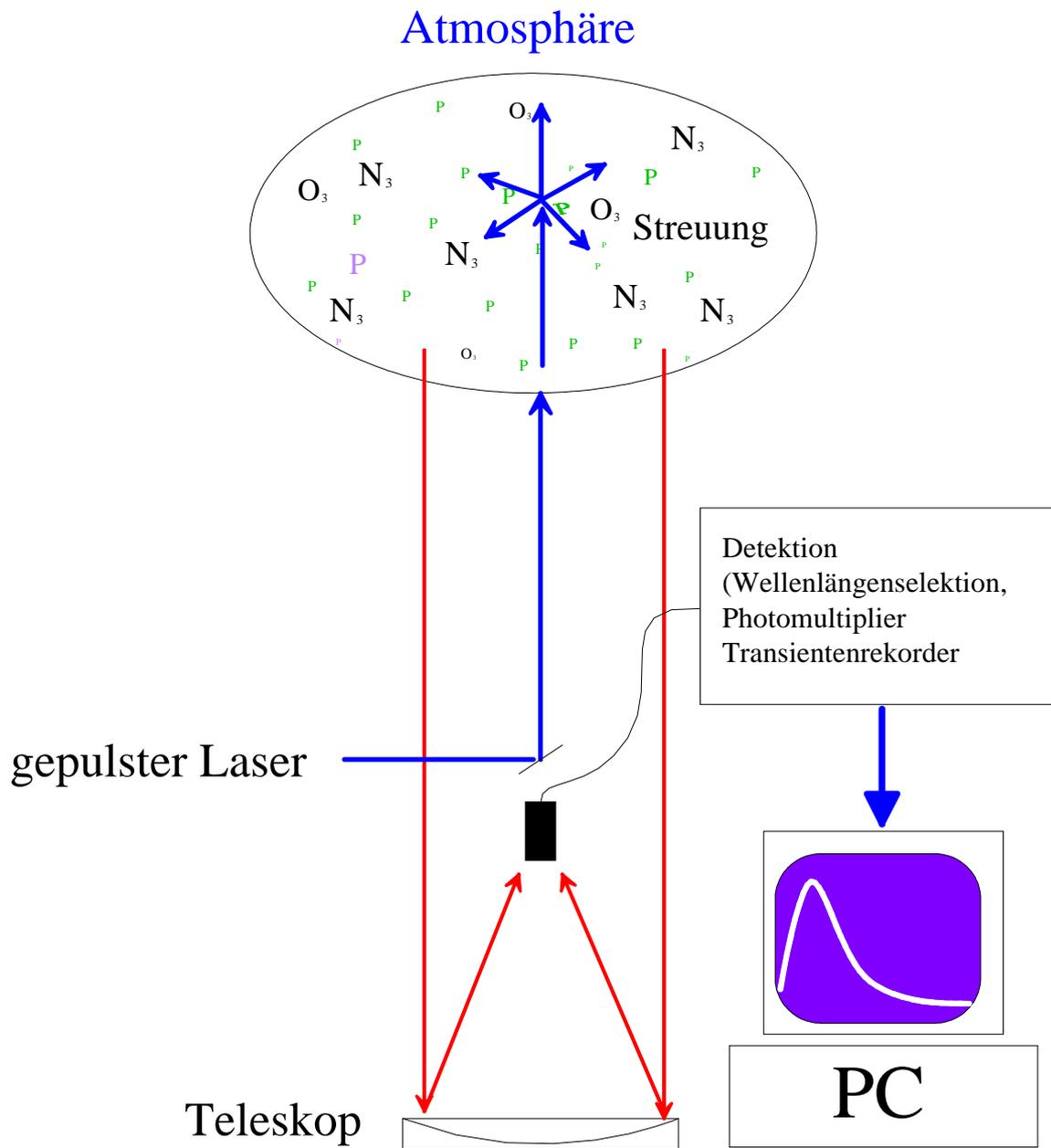


Abbildung 4.1 Schematischer Aufbau eines Lidar-Systems

## 4.1 Allgemeine Grundlagen der Lidar-Technik

### 4.1.1 Meßprinzip

Ein von einem geeigneten Laser erzeugter kurzer Laserpuls wird in die Atmosphäre gesendet. Mit einem Teleskop wird das Streulicht aufgefangen und zeitaufgelöst nachgewiesen. Die mit dem Detektor gemessene Lichtintensität  $I$  in Abhängigkeit von der Entfernung ( $r = t \frac{c}{2}$ ,  $c$  = Lichtgeschwindigkeit) ist dann gegeben durch die Lidar-Gleichung:

$$I_R(r, \lambda) = P_0(\lambda) v_{GK}(r) \frac{A c}{r^2 2} \beta(r, \lambda) \exp\left(-2 \int_0^r \alpha(r', \lambda) dr'\right) \quad (4-1)$$

mit $P_0(\lambda)$ :	Energie pro Laserpuls der Wellenlänge $\lambda$
$v_{GK}$ :	geometrische Kompression
A:	Fläche des Empfangsteleskops
$\beta(r, \lambda)$	Rückstreukoeffizient
$\alpha(r, \lambda)$	Extinktionskoeffizient

Der Faktor  $v_{GK}$  ist insbesondere für troposphärische Systeme von besonderer Bedeutung und wird deshalb im folgenden Kapitel näher darauf eingegangen.

Informationen über die Atmosphäre stecken in den Koeffizienten  $\alpha$  und  $\beta$ . Im Falle der elastischen Streuung setzen sie sich zusammen aus einem Anteil der Molekül- (oder Rayleigh-) Streuung und der Streuung an Partikeln, die auch als Mie-Streuung bezeichnet wird und im vorangegangenen Kapitel beschrieben wurde. Dabei sind  $\alpha$  und  $\beta$  jeweils proportional zur Anzahlkonzentration der Streuer und ihrem Streuquerschnitt, dessen Wellenlängenabhängigkeit gerade im Falle der Partikel hier von besonderem Interesse ist und mit dem polychromen Rückstreulidar gemessen werden soll. Im Falle des DIAL-Verfahrens verbirgt sich die relevante Information in den Extinktionskoeffizienten und wird mit einem weiter unten beschriebenen mathematischen Verfahren daraus extrahiert.

Der Aufbau eines solchen Systems muß den jeweiligen Bedürfnissen angepaßt werden. Besondere Anstrengung erfordert hier in erster Linie der Laser, der Licht hoher Brillanz mit einer oder mehreren Wellenlängen erzeugen muß, die von der Problemstellung in der Regel vorgeben sind. Mit dem Titan-Saphir-Laser [Kolenda, 1992] steht eine solche Laserquelle für troposphärische Ozonmessungen zur Verfügung. Für Aerosol-Messungen hat sich hingegen der Nd:YAG-Laser bewährt, der neben seiner Grundwellenlänge von 1064 nm auch die Frequenzverdoppelte (532 nm) und -verdreifachte (355 nm) zur Verfügung stellen kann.

Auf der Detektionsseite steht zunächst ein parabolischer Teleskopspiegel, der das eingefangene Licht bündelt und in den hier verwendeten Anordnungen in eine optische Faser einkoppelt. Von dort gelangt das Licht weiter in eine Detektionsoptik, die im wesentlichen aus einer Wellenlängenselektion - Spektrometer oder schmalbandige Interferenzfilter -, ggf. einer Polarisationsselektion und einem Detektor - Photoelektronenvervielfacher oder Halbleiterdiode - besteht.

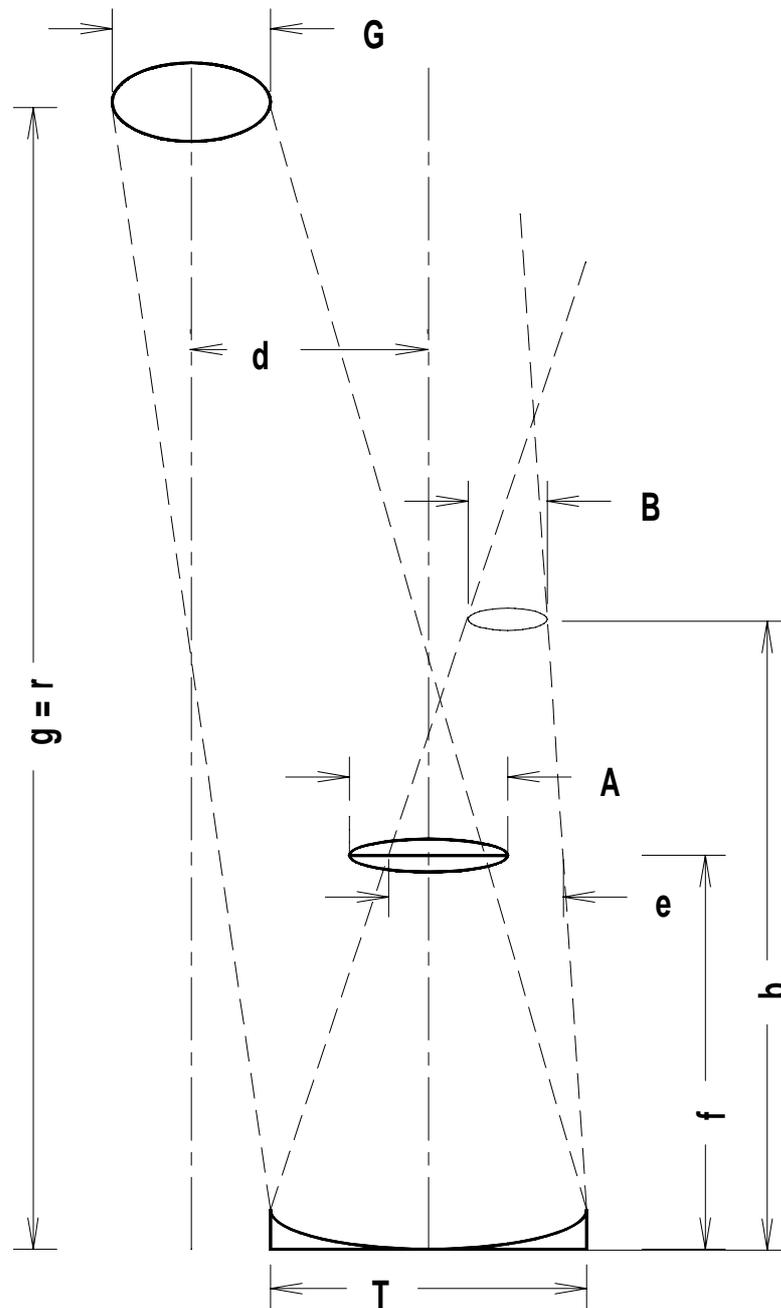


Abbildung 4.2 Zur geometrischen Kompression. Die optische Abbildung des vom Laser beleuchteten Luftpaketes auf die freie Apertur A der Faser im Fokus des Teleskops.

Besondere Sorgfalt ist bei einem solchen Aufbau auf die geometrische Anordnung der Sende- und Empfangsoptik zu richten. Dabei geht es um die Frage, inwieweit der Laserpuls auf seinem Weg durch die Atmosphäre tatsächlich verfolgt werden kann. Dies wird im nächsten Kapitel behandelt.

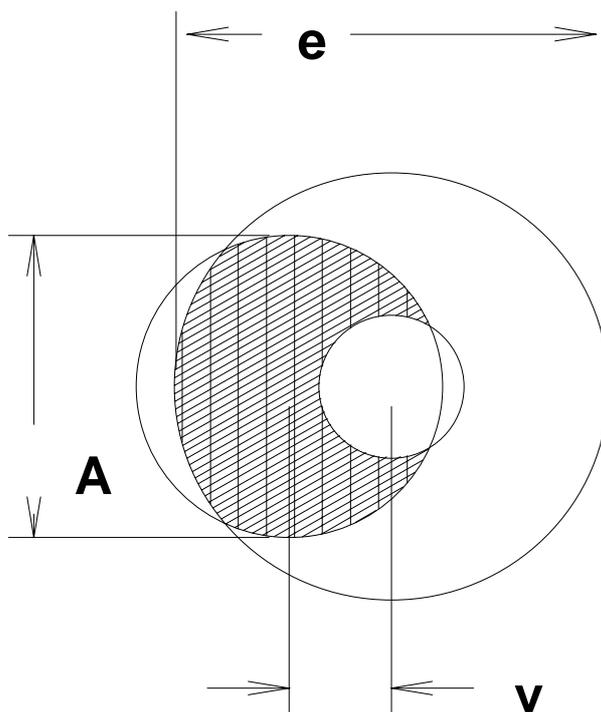


Abbildung 4.3 Zur geometrischen Kompression: Das in der Fokalebene abgebildete Scheibchen hat die Form des Teleskops. hier mit einer Öff-

nung der Fokalebene des Teleskops mit der freien Apertur.  $v_{GK}$  ist damit in erster Linie eine Funktion von  $r$ , der Laserdivergenz  $\delta$  und des Abstandes  $d$  der Laserachse zu Teleskopachse.

In Abbildung 4.2 ist vereinfacht eine entsprechende Anordnung dargestellt. Die geometrische Kompression läßt sich mit Hilfe der optischen Abbildungsgesetze berechnen:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b} \tag{4-2}$$

Dabei ist die Gegenstandsweite  $g = r = c/2 t$  die Distanz des Laserpulses zur Zeit  $t$  und  $f$  die Brennweite des Teleskopspiegels. Die Gegenstandsgröße  $G$  ergibt sich aus der Laserdivergenz  $\delta$  und dem Anfangsstrahldurchmesser  $s$ :

$$G = s + r \delta \tag{4-3}$$

Die Bildgröße  $B$  ist:

$$B = G b/r \tag{4-4}$$

Der Durchmesser  $e$  des abgebildeten Scheibchens in der Fokalebene ist dann gegeben durch

$$e = B b / f + T (b-f) / b \tag{4-5}$$

wobei  $T$  der Durchmesser des Teleskops ist. Der Mittelpunkt dieses Scheibchens ist dabei um

#### 4.1.2 geometrische Kompression

Unter dem Begriff "geometrische Kompression"(GK)  $v_{GK}$  versteht man den Einfluß der geometrischen Anordnung von Sende- und Empfangsoptik auf die Form des empfangenen Signals. Im Nahbereich wird nur der Teil des vom Laser illuminierten Luftpaketes berücksichtigt, der auch tatsächlich auf die Faser im Fokus abgebildet wird. Da das Teleskop auf Unendlich fokussiert ist, wird der Nahbereich aufgrund der endlichen Tiefenschärfe nur unscharf und deshalb meist unvollständig abgebildet. Bei einer bistatischen Anordnung (d.h. die Laserachse ist nicht identisch mit der Teleskopachse) befindet sich außerdem für niedrige Höhen der gesamte oder ein Teil des Laserstrahls außerhalb des 'field-of-view' des Teleskops. Präzise ausgedrückt ist  $v_{GK}$  der Überlapp des Bildes des beleuchteten Luftpaketes in

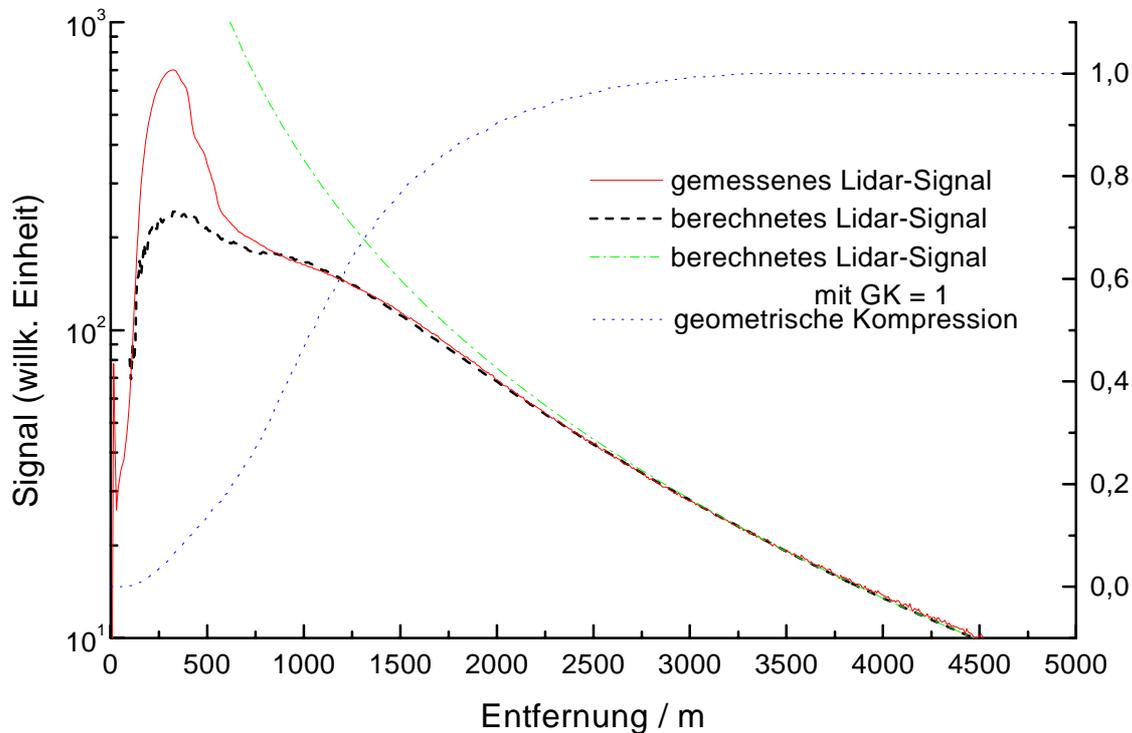


Abbildung 4.4 Vergleich eines echten Lidar-Signals vom Dezember 97 (—) mit einem, für eine reine Rayleigh-Atmosphäre simulierten Signal, mit (- -) und ohne (-.-) Berücksichtigung der geometrischen Kompression.  $v_{GK}$  ist bis zu einer Höhe von 2800 m kleiner eins. Unterhalb von 500 m befindet sich die planetare Grenzschicht mit einer hohen Aerosol-Belastung, so daß hier das gemessene Signal deutlich von dem berechneten abweicht.

$$v = f d / g \quad (4-6)$$

vom Fokus verschoben. Das Scheibchen hat in erster Näherung die Form des Teleskopspiegels. Aus diesen Größen kann man nun die Überlappfunktion ausrechnen. In Abbildung 4.3 ist nochmals die Situation aufgezeichnet, wie sie sich in der Fokalebene des Teleskops darstellt. Dabei wird ein Teleskopspiegel verwendet, der wie bei Cassegrain-Optiken üblich in der Mitte eine Öffnung aufweist. Noch nicht berücksichtigt ist hier eine mögliche teilweise Abdeckung des Teleskops, wie sie durch die notwendigen Aufbauten in der Regel entsteht. Da die Geometrie der Überlappungsfläche recht kompliziert werden kann, wurde zur Berechnung derselben ein numerisches Verfahren in Labview<sup>5</sup> entwickelt, das die Teleskopfläche diskretisiert und so beliebige Formen ermöglicht.

Insgesamt hängt die geometrische Kompression lediglich von folgenden Größen ab: dem Teleskopdurchmesser  $T$ , der Laserdivergenz  $\delta$  und der Apertur  $A$  im Fokus, nicht jedoch, entgegen der intuitiven Vermutung, von der Brennweite des Teleskops. Deshalb ist es möglich, die numerische Apertur der Empfangsoptik beliebig an die der nachfolgenden Detektionsoptik anzupassen, ohne dabei die GK zu beeinflussen.

<sup>5</sup> Grafische Programmiersprache von National Instruments

Für das Design einer Lidar-Detektions-Optik ist die genaue Kenntnis der geometrischen Kompression unerlässlich. Aus diesem Grund wurde hier genauer auf diese Problematik eingegangen. Daß die hier aufgezeigte - immer noch vereinfachte - Herangehensweise die Wirklichkeit recht gut beschreibt, zeigt der Vergleich der simulierten Lidar-Signale mit gemessenen Signalen an Tagen mit geringer Aerosol-Belastung in den unteren Luftschichten. In Abbildung 4.4 ist eine entsprechende Gegenüberstellung an einem Beispiel demonstriert. Dabei handelt es sich um ein Lidar-Signal, daß mit dem DIAL-System (Ti:Sa) auf der Charité gemessen wurde. Die geometrische Kompression spielte in diesem speziellen Beispiel bis zu einer Höhe von ca. 2800 m eine Rolle. Darüber wird der Faktor  $v_{GK}$  (= Überlappungsfläche / Fläche der Apertur) konstant eins. Unterhalb von 500 m befindet sich die planetare Grenzschicht mit einer hohen Aerosol-Belastung und erklärt die starke Abweichung der Signale in diesem Bereich. Darüber ist der Aerosolgehalt vernachlässigbar gering. Die Form des Signals wird also im Bereich von 500 m bis 2800 u.a. von  $v_{GK}$  bestimmt. In diesem Bereich zeigen beide Signale eine hohes Maß an Übereinstimmung.

Sowohl für Konzentrationsmessungen mit DIAL als auch für Aerosol-Sondierungen ist es nicht möglich die Signale im Bereich der geometrischen Kompression auszuwerten. Daher ist es notwendig, die Sende- und Empfangsoptik so abzustimmen, daß in dem Höhenbereich von Interesse ein vollständiger Überlapp von Laserstrahl und Gesichtsfeld des Teleskops sichergestellt ist. Für diese Arbeit war insbesondere der Bereich der planetaren Grenzschicht von Interesse, die im Sommer bis zu 3 km mächtig sein kann. Die Empfangsoptik des DIAL-Systems wurde deshalb bezüglich seiner geometrischen Kompression so optimiert, daß im Bereich von 200 m bis ca. 6 km gute Meßergebnisse erzielt werden können. Durch Verwendung eines kleineren Teleskops und einer Faser mit größerem Durchmesser als in der für Abbildung 4.4 verwendeten Optik, konnte der Bereich der GK auf unter 800 m gesenkt werden. Der darunterliegende Bereich ist dann noch mit Hilfe sogenannter vertikaler Scans erreichbar (vgl. 4.2.1.2).

Um Mehrfrequenz-Rückstreuungsmessungen des Aerosols in der Grenzschicht durchführen zu können, wurde ein neues Empfangsteleskop konstruiert und in den auf der Charité vorhandenen Aufbau für stratosphärische Messungen so integriert, daß wahlweise die Tropo- oder Stratosphäre sondiert werden kann. Im nächsten Kapitel wird eine genauere Beschreibung dieser Systeme gegeben.

## Lidar-Station Charité: Ozon-DIAL

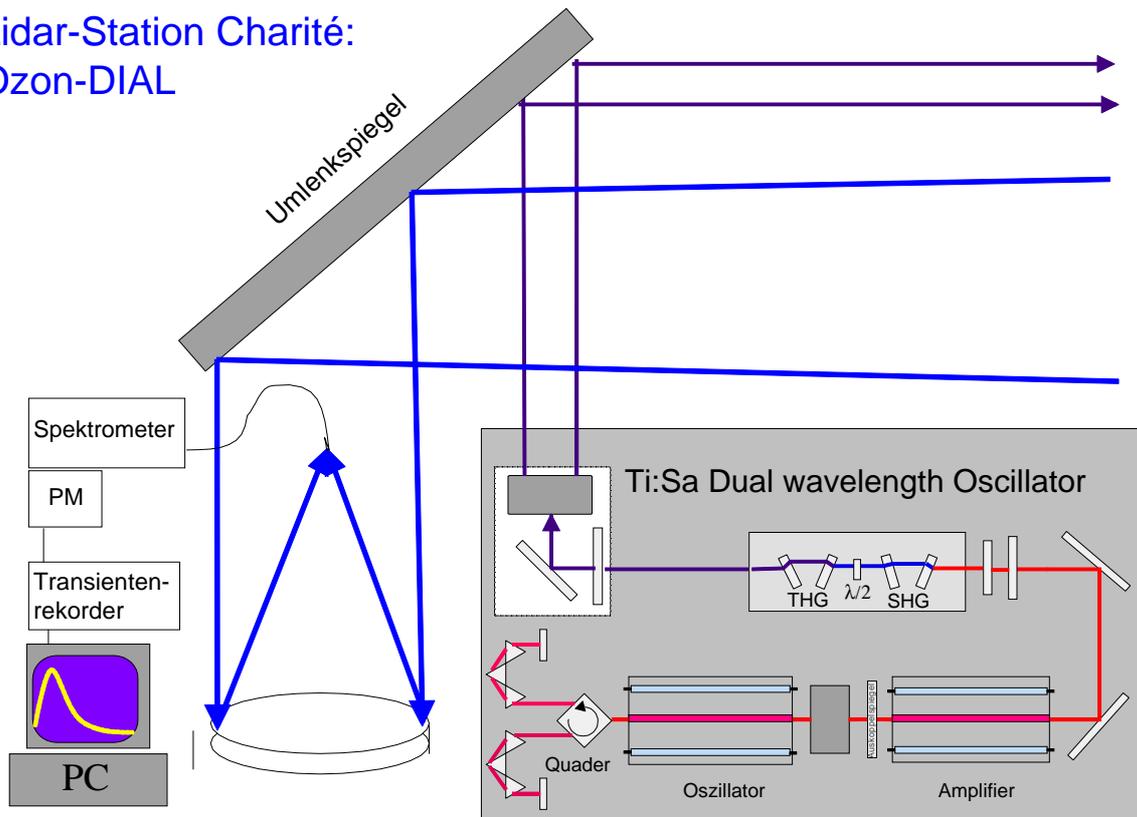


Abbildung 4.5 Schematische Darstellung des DIAL-Systems. Rechts unten der Ti:SA-Laser mit Doppelloszillator und Frequenzverdopplung bzw. -Verdreifachung. Der Laserpuls wird dann aufgeweitet und ggf. über einen Umlenkspiegel in die Atmosphäre gesendet. Der Teleskopspiegel koppelt das Rückstreusignal in eine Faser ein. Diese führt es über ein Spektrometer zur Hintergrundlichtreduktion der Detektion zu.

## 4.2 Die Meßstation Charité

Das Hochhaus des Universitätsklinikums Charité in Berlin Mitte bietet durch seine zentrale Lage im Zentrum der Hauptstadt, sowie durch seine Höhe von ca. 90 m eine geeignete Observationsplattform für Untersuchungen der urbanen Atmosphäre. In den Aufbau auf dem Dach des Gebäudes, das seinerzeit von der Stasi der DDR zu Spionagezwecken als Gehäuse für Radaranlagen gebaut wurde, hat unsere Arbeitsgruppe in mehrjähriger Arbeit ein Labor eingerichtet, das 2 Lidarsysteme und die dazugehörige Laborfläche beherbergt. Bei dem ersten der beiden Systeme handelt es sich um ein Differentielles Absorptions Lidar (DIAL), das primär für troposphärische Ozonmessungen konstruiert ist. Das zweite System dient der Sondierung von Aerosol in der Stratosphäre. Durch den Einbau eines zweiten Detektionsteleskops in diesen Aufbau kann damit nun auch Aerosol in der Troposphäre nachgewiesen werden.

Tabelle 4.1 Spezifikationen des DIAL-Systems

<b>Laser</b>	blitzlampengepumpter Titan:Saphir mit Doppeloszillator, 20 Hz Rep.Rate gütegeschalteter Oszillator, Verstärker SHG, THG		
Wellenlängen	750 nm - 900 nm	SHG: 375 nm - 450 nm	THG: 250 nm - 300 nm
Pulsenergie	200 mJ	20 mJ	1 mJ
Bandbreite	1 nm	0,5 nm	0,3 nm
Sendeoptik	Aufweitung: Off-axis 1:20 Sendespiegel mit Picomotoren justierbar, Sendestrahl: Ø 100 mm, Divergenz 0,25 mrad		
<b>Detektion</b>			
Teleskop	Ø 400 mm, f = 1200 mm		
Scanning	Umlenkspiegel 1200 mm x 600 mm, max Elevation: 50° (Zenith)		
Faser	Ø1,5 mm, num. Apertur= 0,22, Herst.: Ceram UV (Quartz)		
Wellenlängen- selektion	Spektrometer, Typ.: Hohlgitter, 1200 / mm (?), Auflösung: 1-4 nm		
PM	EMI		
Transienten- recorder	Typ: Licel, 20 MHz, 12 bit		
Software	Aquisitionsoftware und Online-Auswerteprogramm auf Labview-Basis		
<b>Spurengas</b>	<b>Ozon</b>		
	$\lambda_{on}$	$\lambda_{off}$	
Wellenlänge	282,9 nm	286,4 nm	
$\sigma / 10^{-23} \text{ m}^2$	29,7	20,6	8,9 diff.
Meßbereich	0,8 bis ca. 2,5 km		
Detektionslimit	20 µg / m <sup>3</sup> bei 300 m Höhengauflösung		

#### 4.2.1 Das DIAL-System

Die Bestimmung der Konzentration von Spurengasen erfolgt über die differentielle Absorption. Zu messen ist also die unterschiedlich starke Absorption eines Moleküls bei verschiedenen Wellenlängen. Der Titan:Saphir-Laser produziert dank des Doppeloszillators abwechselnd zwei Wellenlängen, die im Bereich von 750 nm bis 900 nm durchstimbar sind [Kolenda, 1993]. Durch Frequenzverdreifung erreicht man den Wellenlängenbereich von 250 nm bis 300 nm. Hier besitzt u.a. Ozon eine starke Absorptionsbande, die Hartley-Bande. Entlang dieser breiten und steilen Absorptionskante besitzt man mehrere Möglichkeiten für die Auswahl von Meß- und Referenzwellenlänge ( $\lambda_{on}$ ,  $\lambda_{off}$ ) [Weitkamp,

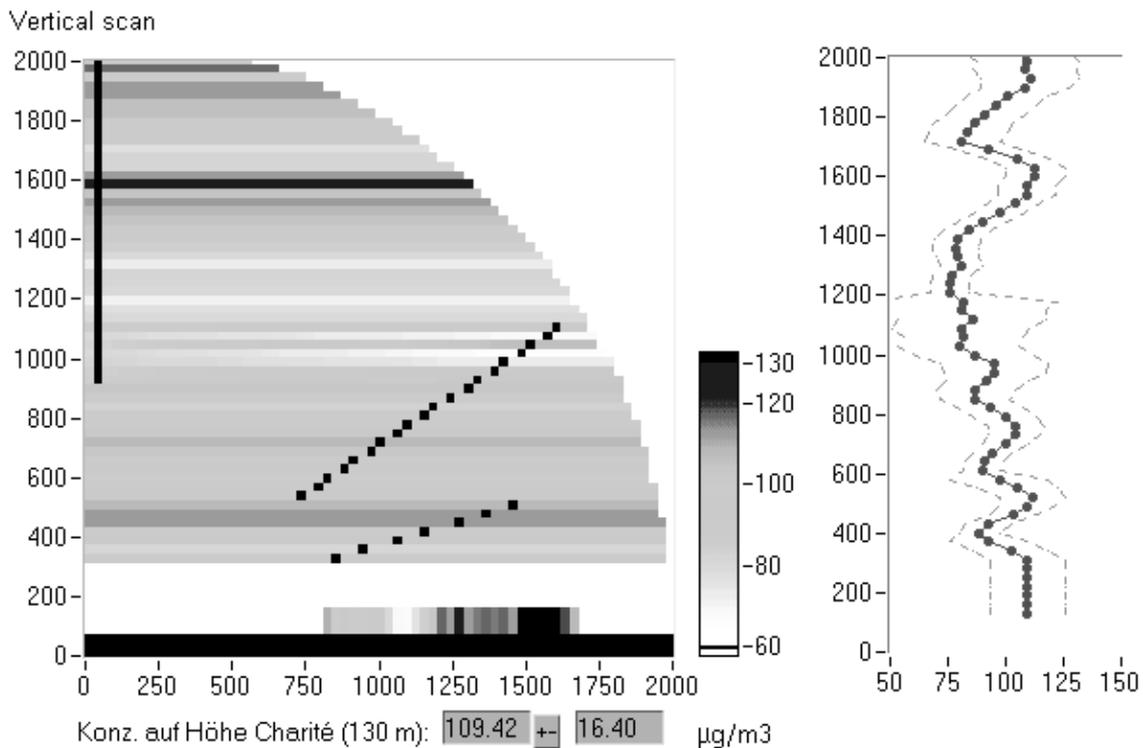


Abbildung 4.6 Profilmessung mit Hilfe eines vertikalen Scans. Die schwarzen Linien in der linken Abb. zeigen die Richtung der Messung an (Das DIAL befindet sich im Ursprung, nach rechts ist die horizontale, noch oben die vertikale Entfernung in m aufgetragen). Rechts ist das durch horizontale Mittelwertbildung berechnete Vertikalprofil aufgetragen.

1992]. Diese Wellenlängen sind so zu wählen, daß folgende Punkte Berücksichtigung finden:

- Ausreichend Pulsenergie vom Laser
- Keine oder geringe Querempfindlichkeit mit anderen Spurengasen und Aerosolen (die Wellenlängen sollten daher nicht zu weit auseinander liegen).
- hohe differentielle Absorption bei gleichzeitig möglichst geringer Absorption von  $\lambda_{\text{on}}$ , um die Reichweite nicht zu sehr einzuschränken. Hier muß also ein für die aktuelle Situation günstiger Kompromiß gefunden werden.

Eine geeignete Einstellung für Ozonmessungen während Sommersmogepisoden wurde bei  $\lambda_{\text{on}} = 282.9 \text{ nm}$   $\lambda_{\text{off}} = 286.4 \text{ nm}$  gefunden. Der differentielle Wirkungsquerschnitt von  $8,9 \times 10^{-23} \text{ m}^2$  [Weitkamp, 1992] ermöglicht eine ausreichende Genauigkeit der Messung und der Absorptionsquerschnitt ist bei beiden Wellenlängen noch nicht zu hoch. Bei Ozonkonzentrationen von um die  $100 \text{ µg/m}^3$  wird der Laserpuls binnen des ersten Kilometers vom Ozon absorbiert, wenn man bei kürzeren Wellenlängen arbeitet. Mit dem genannten Wellenlängenpaar erreicht man auch unter solchen Bedingungen noch eine Reichweite von über 2 km. Die optische Konfiguration des Empfangsteleskops wurde so optimiert, daß die geometrische Kompression, nach 800 m konstant gleich 1 ist (vgl. 4.1.2). Daraus ergibt

sich also ein Meßbereich von 800 m bis 2 km (bei niedrigeren Ozonkonzentrationen auch bis 3 km).

Prinzipiell sind auch andere Spurengase, wie z.B.  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$  (bei 400 nm (THG)), sowie Aromate mit diesem Meßverfahren zugänglich. Allerdings ergeben sich wegen der relativ breiten Laserlinien bei den Molekülen mit schmalen Absorptionslinien und Querempfindlichkeiten hier praktische Probleme.

#### 4.2.1.1 Signalverarbeitung

Die in dieser Arbeit verwendeten Spezifikationen der Systemkomponenten sind Tabelle 4.1 zu entnehmen. Die Aufzeichnung der an den Photoelektronenvervielfachern gemessenen Signalintensität erfolgt mit Transientenrekordern der Firma Licel mit einer Frequenz von 20 MHz - das entspricht einer Ortsauflösung von 7,5 m - die sowohl analog messen, wie auch einzelne Photonen zählen können. Für die Ozonmessung wurde der analoge Betrieb bevorzugt, weil bei der Signalstärke im Nahbereich der Einzelphotonenzählbetrieb wegen der zunehmenden Anzahl von Koinzidenzen Nichtlinearitäten aufweist.

Störungen werden hauptsächlich durch das Photonenrauschen sowohl des Signals selbst, wie auch im Hintergrund verursacht. Diesem wird begegnet, indem man eine genügend große Anzahl von Einzelschußsignalen aufsummiert, bis das Signal-Rausch-Verhältnis im gewünschten Höhenbereich groß genug ist und gleichzeitig die Meßdauer noch erträglich kurz bleibt. Typischerweise werden daher 4000 Einzelsignale, d.h. 2000 pro Wellenlänge, aufsummiert, bevor sie abgespeichert werden. Die Meßdauer beträgt dann gut drei Minuten.

Die gesamte Experimentsteuerung wird von einem zentralen PC übernommen, der sowohl die Datenerfassung und -speicherung übernimmt, als auch einzelne Hardwarekomponenten wie den Laser und den Umlenkspiegel ansteuern kann. Dadurch wird ermöglicht, daß das System Meßaufgaben im automatischen Betrieb ausführen kann.

#### 4.2.1.2 Profilmessungen im Scanbetrieb

Für die BERLIOZ-Kampagne sollten Ozonprofile der unteren Troposphäre bis möglichst in Bodennähe aufgezeichnet werden. Da, wie erwähnt, trotz einer Anpassung der Detektionsoptik der Bereich unterhalb von 800 m mit dem DIAL System bei vertikaler Ausrichtung des Lasers nicht erfaßt werden kann, ist es hierzu nötig, mit Hilfe des großen Umlenkspiegels Messungen in horizontaler Richtung und mit verschiedenen Zenithwinkeln durchzuführen. Unter der Annahme einer gleichen Konzentration des Ozons in horizontaler Richtung kann hieraus ein Vertikalprofil erstellt werden.

Abbildung 4.6 zeigt eine solche Messung und verdeutlicht das Prinzip dieser Methode. Man erreicht somit die Grenzschicht von der Höhe der Charité an, das sind 134 m MSL, bis zu 2-3 km Höhe. Problematisch ist dabei, daß die Alignierung von Laserstrahl zu Teleskopachse nach Verstellen des Umlenkspiegels jedesmal überprüft und nachgeregelt werden muß. Aus diesem Grund wurde der Sendespiegel mit einer Schrittmotorsteuerung ausgestattet und eine Ansteuerung derselben vom PC aus realisiert. Eine in die Systemsoftware integrierte Autoalignierungs-Routine übernimmt dann die Justage des Laserstrahles.

Insgesamt nimmt dadurch die Messung eines Vertikalprofiles etwa 20 Minuten in Anspruch.

Da während der BERLIOZ-Kampagne eine der Hardwarekomponenten ausfiel, wurde die Alignierung jeweils manuell durchgeführt.

#### 4.2.2 Das polychrome Rückstreulidar

Für die Sondierung von Aerosol benötigt man einen leistungsstarken Laser, der mehrere Wellenlängen über einen möglichst breiten Spektralbereich zur Verfügung stellt. Der Nd:YAG bietet diese Eigenschaften (siehe Tabelle 4.2). Die Detektion der Rückstreuung erfolgt über je ein Teleskop (Tropo, Strato), die das Licht in eine Faser koppeln und dann derselben Detektionskette zuführen. Diese kostensparende Konfiguration erlaubt allerdings keine simultanen Messungen in beiden Regionen. Die verschiedenen Wellenlängen werden über dichroische Spiegel getrennt und der Hintergrund mit Hilfe von Interferenzfiltern abgetrennt (vgl. Abbildung 4.7). Der Nachweis erfolgt dann über Photoelektronenvervielfacher (PM), bzw. - im Falle der 1064 nm - über eine Silizium Avalanche Photo Diode (APD) mit nachgeschalteter elektronischer Verstärkung [Immler, 1995]. Der gesamte Aufbau ist in Abbildung 4.7 schematisch dargestellt.

Tabelle 4.2 Spezifikationen des Vielfarben-Rückstreu-LIDARs

<b>Laser</b>	blitzlampengepumpter Nd:YAG, 30 Hz			
Wellenlänge	1064 nm	532 nm (SHG)	355 nm (THG)	
Pulsenergie	1 J	200 mJ	30 mJ	
<b>Detektion</b>	<b>Strato</b>		<b>Tropo</b>	
Teleskop	Ø 600 mm, f = 1800 mm		Ø 150 mm, f(effektiv)=250 mm eingebauter Polarisator	
Faser	Ø 1mm, num. Apertur = 0,22, Quartz			
Wellenlängen- selektion	dichroische Spiegel			
<b>Nachweis</b>	1064 nm	532 nm	355 nm	387 nm
Interferenz- Filter	1064 nm ± 1nm	532 nm ± 0,2 nm	355 nm ± 2 nm	387 nm ± 2 nm
Detektor	APD (EG&G) Ø1mm	PM (EMI) analo- ger Betrieb	PM (Hamamatsu) analoger Betrieb	PM (Hamamatsu) Photoncounting
Transienten- recorder	Licel 20 Mhz, 12 bit			

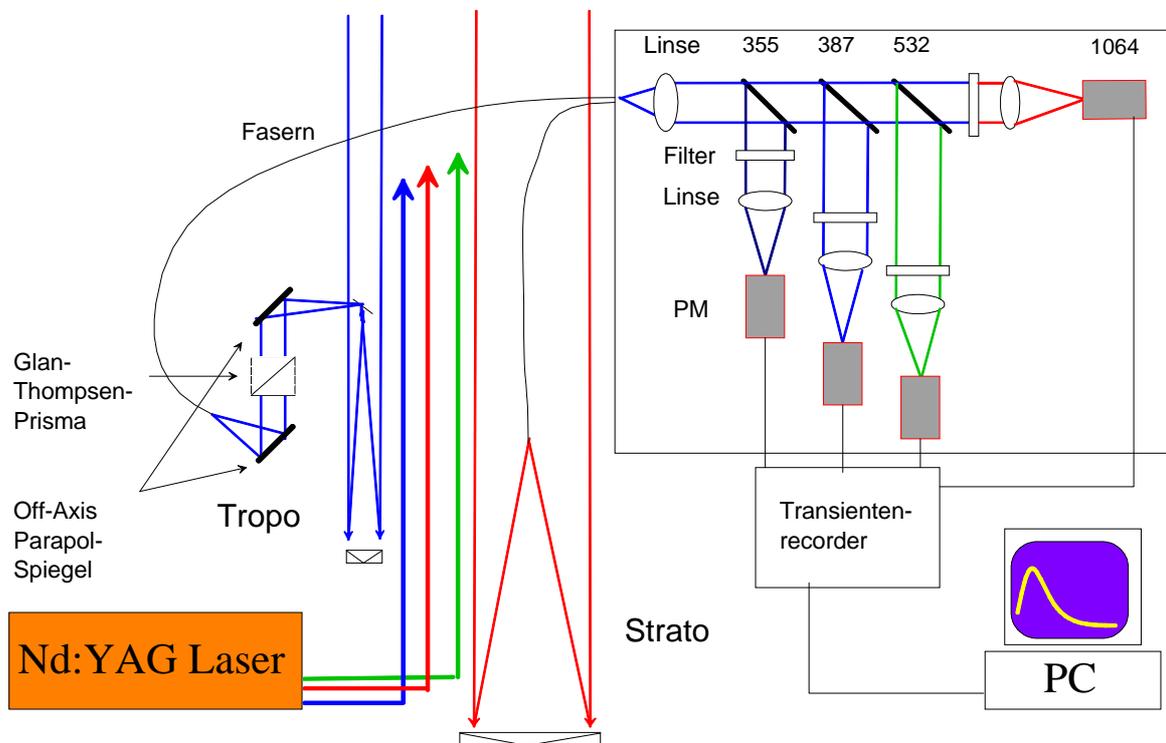


Abbildung 4.7 schematischer Aufbau des Aerosol-Lidar-Systems auf der Charité. Erläuterung siehe Text.

#### 4.2.2.1 Der Tropo-Aerosol-Detektor (TAD)

Für die Detektion von troposphärischen Aerosolen sind die folgenden Spezifikationen erforderlich:

- Die geometrische Kompression sollte nicht weiter als 200 m reichen und das bei allen 3 Farben des Nd:YAG-Lasers.
- Möglichkeit der polarisationsabhängigen Detektion.
- Einbau eines Meßkanals für die Raman-Streuung an  $N_2$  bei 387 nm.
- Niedrige Kosten, d.h. in diesem Fall Nutzung der Nachweioptik und -Elektronik, die für stratosphärische Messungen bei dem LIDAR auf der Charité bereits installiert ist.

Der letzte Punkt wurde dadurch realisiert, daß, wie in Abbildung 4.7 dargestellt, zwar eine eigene Empfangsoptik für die troposphärischen Messungen hinzugefügt wurde, über die Faserankopplung aber die vorhandene Detektionsoptik und Nachweiselektronik genutzt wurde. Zum Nachweis der Raman-Linie bei 387 nm wurde ein zusätzlicher Kanal

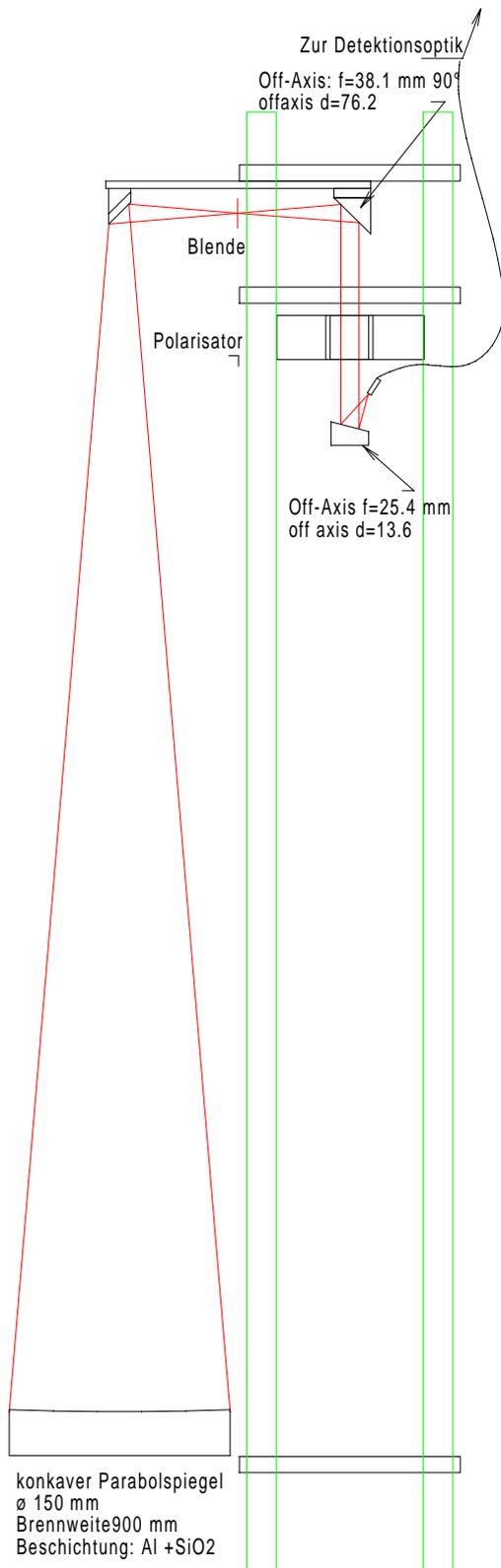


Abbildung 4.8 Darstellung der Empfangsoptik des Tropo-Aerosol-Detektors (TAD)

- bestehend aus einem dichroischen Spiegel zur Auskopplung, einem schmalbandigen Filter und einem Photoelektronenvervielfacher - hinzugefügt.

Als Primärspiegel wurde ein Parabolspiegel mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Brennweite von 900 mm gewählt, der eine geeignete geometrische Kompression ermöglicht, aber auch noch ausreichende Signalstärke gewährleistet. Um keine Probleme mit der Dispersion zu bekommen - immerhin reichen die Wellenlängen von IR bis ins UV -, wurde auf Linsen verzichtet und eine Empfangsoptik realisiert, die nur auf reflektierende Elemente basiert. Dem Teleskopobjektiv in Newton-Anordnung folgt nach einer Irisblende im Fokus deshalb ein Off-Axis-Paraboloid, der das Strahlenbündel um  $90^\circ$  umlenkt und gleichzeitig parallelisiert. Danach läuft es durch ein Glan-Thompson-Prisma, welches durch einen Motor gedreht werden kann, und trifft dann auf einen zweiten Off-Axis-Paraboloiden, der das Licht unter einem Umlenkwinkel von  $60^\circ$  in eine Quarzfaser fokussiert (Abbildung 4.8). Wegen der niedrigeren effektiven Brennweite dieses Spiegels wird dabei gleichzeitig eine f-Zahl-Anpassung um den Faktor 2 erreicht. Das heißt, die f-Zahl (= Brennweite / Apertur) des Primärspiegels von 6 wird auf 3 geändert. Bei einem Faserdurchmesser von  $a = 1$  mm bedeutet dies ein Gesichtsfeld  $\epsilon$  des Teleskops von 3,3 mrad (Da  $\epsilon = a/f_{\text{eff}} = 3 a/f_T = 3 \text{ mm}/900 \text{ mm}$ ).

Die drei Sendespiegel sind um den Primärspiegel herum angeordnet. Der Abstand  $d$  zwischen Sendeachse und Empfangsachse beträgt so für alle Wellenlängen ca. 100 mm.

Justiert wird die ganze Anordnung lediglich durch Justage des drei-Punkt-

gelagerten Primärspiegels, alle anderen Teile sind fest und - ein Dank an die Werkstatt - präzise installiert. Die Detektionsoptik läßt sich daher leicht und schnell justieren.

Zur Messung der Aerosol-Depolarisation wird das Prisma mit konstanter Geschwindigkeit (8Hz) gedreht und der Laser immer dann getriggert, wenn die Durchlaßrichtung gerade parallel, bzw. senkrecht zur Laserpolarisation steht. Auf diese Weise wird abwechselnd, von Schuß zu Schuß, je die andere Polarisationsrichtung durchgelassen und detektiert. Diese Form der Polarisationsmessung bietet den Vorteil, daß eine nachträgliche Kalibration der Signale nicht erforderlich ist.

#### 4.2.3 Weitere Meßgeräte der Station Charité für BERLIOZ

Während der BERLIOZ-Meßkampagne waren auf der Charité in Zusammenarbeit mit anderen, an BERLIOZ beteiligten Arbeitsgruppen weitere Meßgeräte installiert, die ich hier kurz beschreiben möchte.

##### 4.2.3.1 Ozonmonitor

Von der Gruppe von Prof. Möller (BTU-Cottbus) wurde ein Ozonmonitor (Horiba APOA-350) zur kontinuierlichen Operation auf dem Dach der Charité zur Verfügung gestellt. Dieses Gerät saugt Außenluft an und mißt in einer Absorptionszelle kontinuierlich die lokale Ozonkonzentration. In Zusammenarbeit mit der Qualitätssicherungs-Abteilung (QS) des Institutes für Atmosphärische Umweltforschung (IfU, Garmisch) wurde dieses Gerät kalibriert.

##### 4.2.3.2 UV-B Radiometer

Das Alfred-Wegener-Institut Bremerhaven stellt in Zusammenarbeit mit der Firma Isitec ein UV-B-Radiometer zur Verfügung, das mit Hilfe eines Doppel-Monochromators die Strahlungsintensität im Bereich von 280 nm bis 320 nm mit einer Auflösung von ca. 1,4 nm mißt. Das Gerät arbeitet im automatischen Betrieb und liefert absolut kalibrierte Daten mit einer Zeitauflösung von 5 min.

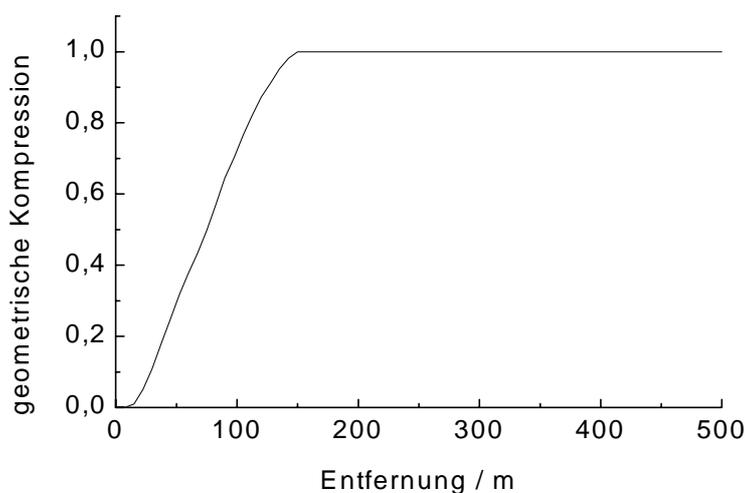


Abbildung 4.9 Geometrische Kompression der Tropo-Aerosol-Detektion bei einer Laserdivergenz von 1 mrad

##### 4.2.3.3 UV-A Radiometer

Eva Eckstein vom Max-Planck-Institut führte während der BERLIOZ-Kampagne Messungen des aktinischen Flusses mit einem Spektralradiometer durch. Während das oben genannte UV-Radiometer

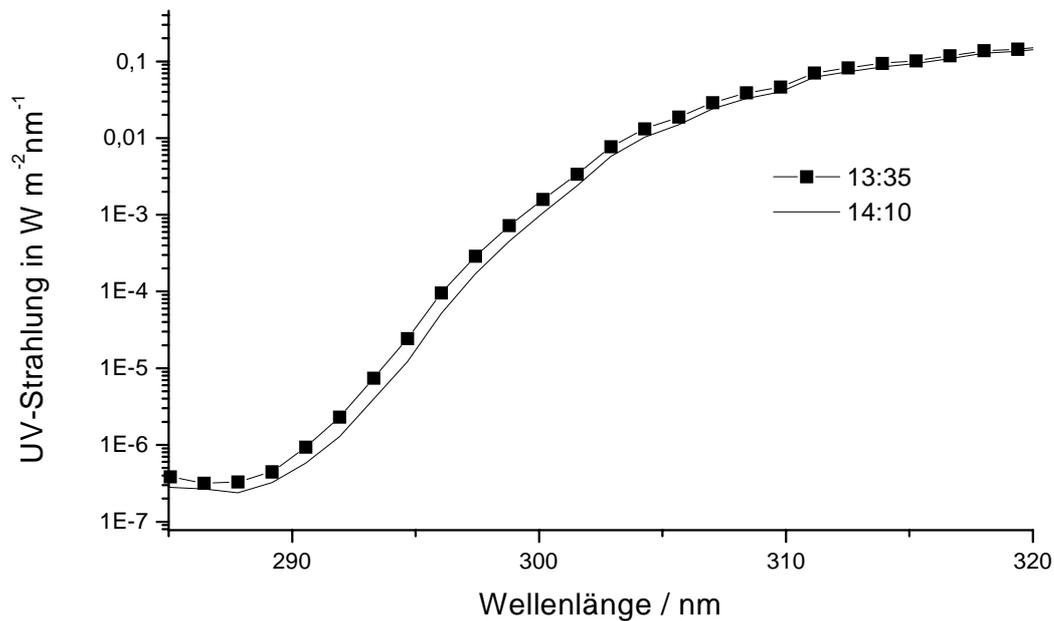


Abbildung 4.10 Beispieldaten des UV-B Spektralradiometers der Firma Isitec.

vom AWI/Isitec die Strahlungsintensität mißt, die auf eine waagrechte Ebene vom oberen Halbraum ( $2\pi$  sr) einfällt, mißt dieses Gerät die Intensität, die auf einer Einheitskugel eintrifft, also das gesamte Strahlungsfeld aus dem Raumwinkel  $4\pi$  sr an einem Ort. Der spektrale Bereich reicht von 300 bis 600 nm mit einer Auflösung von 2,5 nm. Meßdaten liegen aus dem gesamten BERLIOZ-Zeitraum (15.7.-8.8.98) vor.

Diese Daten dienen insbesondere der Bestimmung der Photolysefrequenzen von  $J(\text{O}_3 \rightarrow \text{O}(^1\text{D}))$  und  $J(\text{NO}_2)$  und stellen damit einen wichtigen Parameter zur Modellierung von photochemischer Smogentwicklung zur Verfügung. Sie können zusätzlich zum Vergleich mit Strahlungstransfer-Modellierung, die Barbara Früh vom Institut für Atmosphärenphysik der Universität Mainz durchführt, herangezogen werden, um den Einfluß von Wolken und Aerosolen auf die oben genannten Photolyseraten zu evaluieren. Dafür können auch die mit dem Lidar gemessenen Daten eingehen, so daß der Vergleich mit den Radiometer-Daten ein Schließungsexperiment darstellt, das zeigen kann, ob die Eigenschaften der Aerosole auf den Strahlungstransfer mit Hilfe von Lidardaten und entsprechender Modellierung richtig erfaßt werden können.