

Kapitel 7

Ergebnisse aus der BERLIOZ- Meßkampagne

Die Feldmeßkampagne BERLIOZ fand vom 14.7.1998 bis 8.8.1998 in Berlin und Brandenburg statt und bot eine ausgezeichnete Möglichkeit, die Fähigkeiten und Begrenzungen des Lidarsystems der FU Berlin auf der Charité aufzuzeigen. Die Vielzahl an Daten und Modellanalysen, die im Rahmen des TFS-Programmes von den unterschiedlichen Arbeitsgruppen erarbeitet wurden - und werden -, ermöglichen sowohl der Frage nach der Qualität von Lidarmessungen wie auch deren Interpretation auf breiter Basis nachzugehen.

Aufgabe der Station Charité war es, möglichst während des gesamten Zeitraumes Ozonvertikalprofile zu messen. Während der Intensivmeßphasen sollten diese Messungen rund um die Uhr und zeitlich so dicht wie möglich stattfinden. Die auf fünf Tage während des BERLIOZ-Zeitraumes begrenzten Intensivmeßzeiten sollten an Tagen stattfinden, an denen genügend Sonneneinstrahlung zur Bildung von Photosmog erwartet wurde und ein Wind aus Südwest wehte, also entlang der Achse, an der die Meßstationen aufgereiht waren (vgl. Kapitel 1.3). Leider entsprachen während der BERLIOZ-Periode nur wenige Tage diesen Anforderungen.

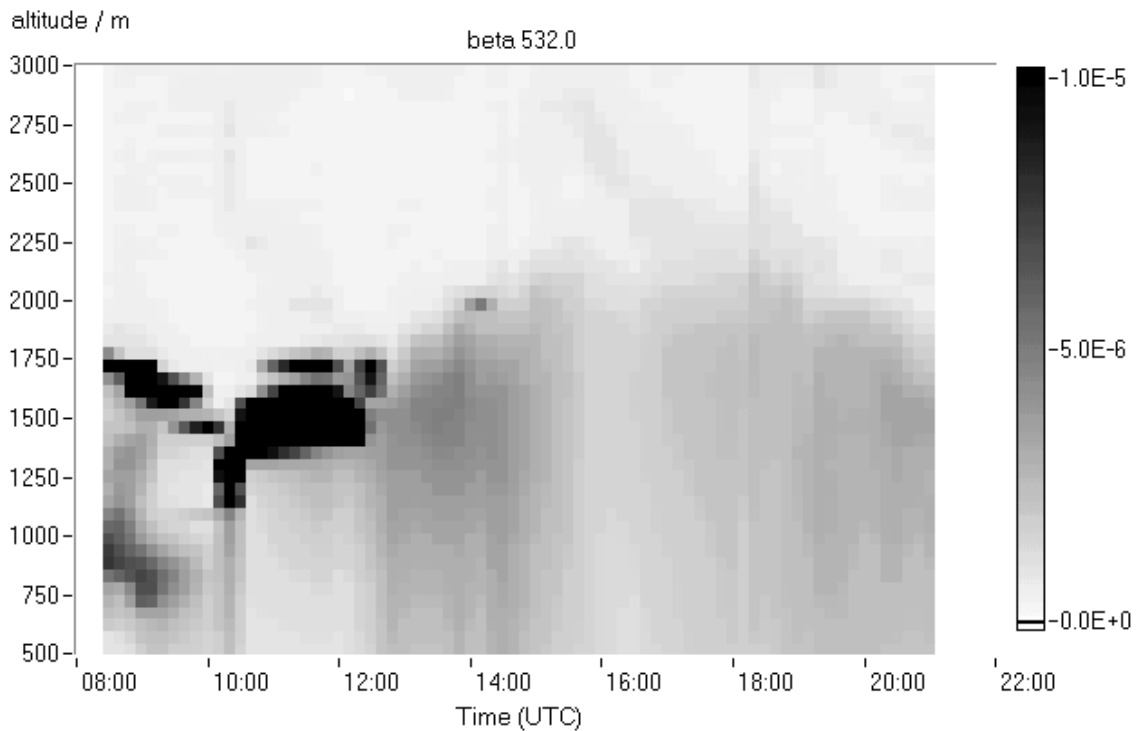


Abbildung 7.1 Aerosolrückstreuung am 8.8.98 bei 532 nm, aufgetragen gegen Zeit und Höhe. Die aerosolreiche Grenzschicht (grau) hebt sich deutlich von der aerosolarmen freien Troposphäre ab. Schwarz treten die Wolken hervor, die am Vormittag die Grenzschicht nach oben hin begrenzen.

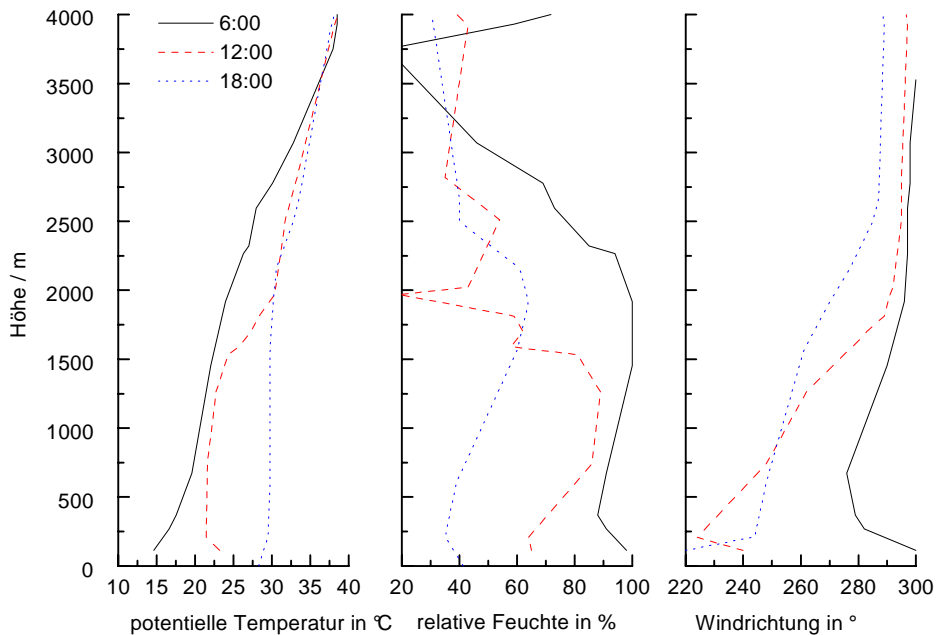


Abbildung 7.2 Radiosondendaten von Lindenberg vom 8.8.98. Links ist die potentielle Temperatur dargestellt ($\Theta = T \cdot (p_0 / p)^{0,286}$). Die Schichtung ist stabil, wenn Θ mit der Höhe ansteigt. Innerhalb der Mischungsschicht ist die Schichtung indifferent ($\Theta = \text{konst}$).

Die Station auf der Charité war zum Zeitpunkt der Meßkampagne voll einsatzfähig, mit Ausnahme der polarisationsabhängigen Rückstreuung. In der ersten Woche war außerdem der simultane Meßbetrieb des Aerosol-Lidars (TAD) und des DIAL-Systems wegen technischer Probleme nicht möglich.

Trotz dieser Probleme konnte eine große Menge an Daten gewonnen werden, die ich im folgenden vorstellen möchte. Ich beginne mit dem letzten Tag der Kampagne, da dieser einigen Modellcharakter vorweisen kann.

7.1 Photosmogentwicklung in einer stabilen Grenzschicht: Der 8. August 1998

An diesem Tag waren die meteorologischen Grundvoraussetzungen nahezu ideal für eine Untersuchung der Entwicklung photochemischen Smogs in der Grenzschicht. Abgesehen von einer bewölkten Phase am Vormittag gab es ausreichend Sonnenschein, außerdem bildete sich eine lehrbuchartige Grenz- und Mischungsschicht aus (vgl. Einleitung). Am vorhergehenden Freitag regnete es, so daß man von einer wenig vorbelasteten Atmosphäre ausgehen kann.

7.1.1 Die Grenzschicht

In Abbildung 7.1 ist das Ergebnis der Aerosol-Messung mit dem TAD dargestellt. Die Grafik zeigt, in Grauwerten kodiert, den RSK bei 532 nm. Insgesamt erkennt man vom Boden bis ca. 2000 m Höhe eine stark mit Aerosolen beladene Schicht und darüber eine aerosolarme Region, die freie Troposphäre. Man sieht in den Vormittagsstunden die Wolken, die in der Grafik schwarz hervortreten. Darunter zeigt sich die Grenzschicht zunächst deutlich strukturiert (siehe auch Abbildung 7.3). Später zeigt sich das Aerosol gleichmäßiger über die Höhe verteilt.

In Abbildung 7.2 sind Radiosondendaten der meteorologischen Station in Lindenberg dargestellt. Aus der Windrichtung läßt sich nach der in der Einleitung genannten Definition die Grenzschichthöhe ablesen. Diese beträgt um 6:00 Uhr etwa 1900 m, um 12:00 liegt sie 100 m tiefer und um 18:00 dehnt sich die Grenzschicht bis 2500 m Höhe aus. Dies stimmt sehr gut mit den Grenzen der aerosolbeladenen Schicht, wie sie in Abbildung 7.1 zu sehen ist, überein. Die Grenze zwischen PBL und freier Troposphäre ist bis ca. 15:00 UTC recht scharf ausgeprägt, am Nachmittag zeigt sie sich verwischter (Abbildung 7.3). Der Grund dafür ist die Temperaturinversion, die noch um 12:00 die Grenzschicht nach oben hin begrenzt und um 18:00 nicht mehr in dem Maße existiert (Abbildung 7.2).

Man ersieht daraus, daß die Aerosolrückstreuung ein sehr guter Indikator für die Grenzschicht darstellt und sich einige Details über deren Struktur und zeitliche Entwicklung mit Hilfe der Aerosole erkennen lassen. Dies gilt ebenso für die Mischungsschicht.

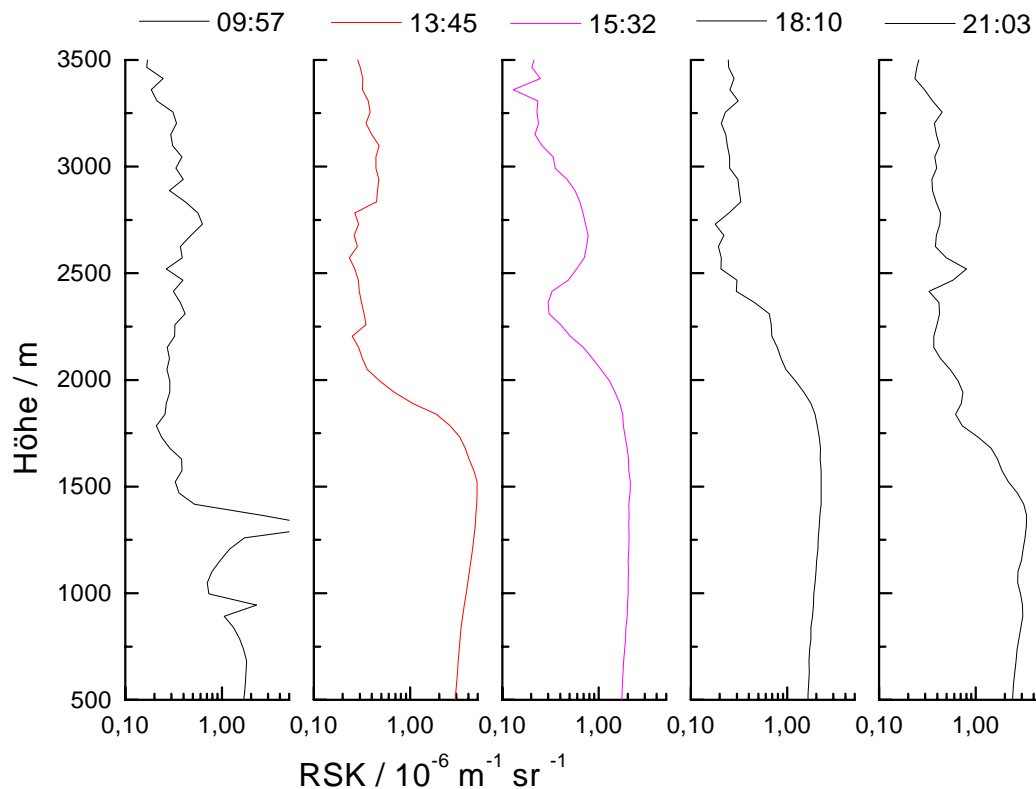


Abbildung 7.3 Rückstreupprofile vom 8.8.98. Die Aerosolrückstreuung in der Grenzschicht liegt etwa eine Größenordnung über der der freien Troposphäre. Der glatte Verlauf der Rückstreuung mit der Höhe läßt auf eine starke Durchmischung der Grenzschicht schließen. Um 9:57 reicht diese lediglich bis ca. 750 m. Am Abend (21:03) weisen erste Unebenheiten darauf hin, daß die Turbulenz nachgelassen hat.

7.1.2 Die Mischungsschicht

Schon zu Beginn der Meßzeit (8:00 UTC) beginnt sich die Mischungsschicht vom Boden her auszudehnen. Man erkennt dies am Verlauf der Rückstreupprofile, die hier keine erkennbare Strukturierung mit der Höhe mehr aufweisen. Etwa um 10:00 Uhr ist die gesamte Grenzschicht durchmischt, unter Bildung von Wolken am oberen Ende. Nach Auflösung der Wolken findet man eine sehr scharf definierte Grenzschicht vor, da hier eine weitere Ausdehnung der Durchmischung durch die Temperaturinversion verhindert wird.

Etwa um 15:00 wird die Temperaturinversion aufgehoben und die klare Grenze zwischen freier Troposphäre und Grenzschicht beginnt sich zu verwischen. Es bildet sich eine Übergangsschicht aus, die bis zu 200 m mächtig ist und in der die Aerosolkonzentration kontinuierlich abnimmt. Ein Hinweis darauf, daß hier Austauschprozesse mit der freien Troposphäre in größerem Umfang stattfinden, findet man aber nicht: Oberhalb der Grenzschichthöhe ist kaum erhöhte Aerosolstreuung festzustellen (Abbildung 7.3, Mitte). Erst gegen 21:00 UTC macht sich wieder eine Strukturierung im Aerosolprofil bemerkbar (Abbildung 7.3). Die Turbulenz kommt zum Erliegen und nur langsam "entmischt" sich die Grenzschicht.

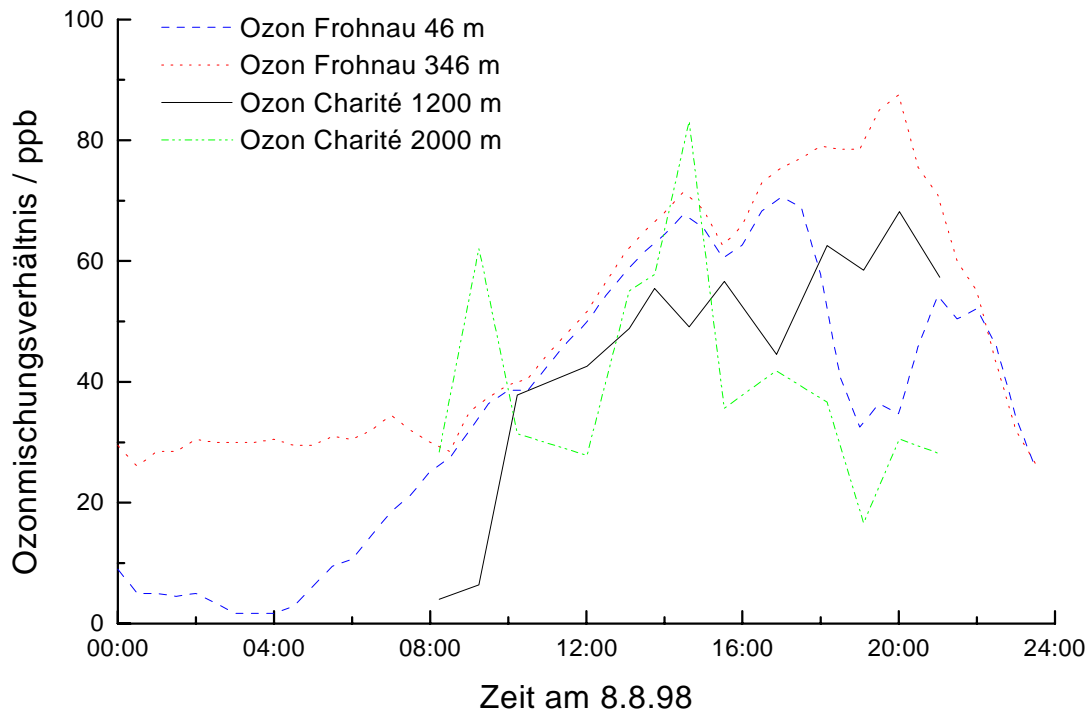


Abbildung 7.4 Vergleich von Zeitreihen der Lidar-Ozonnmessung mit Messungen von BLUME am Frohnauer Turm.

7.1.3 Ozon

Abbildung 7.5 zeigt die Ergebnisse der DIAL-Auswertung. Die Ozonkonzentration ist in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ farbkodiert als Funktion der Zeit und der Höhe dargestellt. Zusätzlich wurden hier die oben beschriebenen Resultate der Aerosolmessungen eingezeichnet, namentlich die Höhe der Grenz- und der Mischungsschicht, sowie das Auftreten von Wolken.

Die Ozonkonzentration nimmt darin über den Tag hin beständig zu. Während morgens die Konzentrationen noch recht niedrig sind, erreichen sie am Nachmittag Werte bis $130 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Man erkennt, daß die Entwicklung des photochemischen Smogs, die man hier beobachten kann, im wesentlichen auf die Mischungsschicht begrenzt bleibt.

In Abbildung 7.4 werden die Lidardaten mit Daten der BLUME⁶-Meßstation am Frohnauer Turm verglichen, dort wurde während BERLIOZ sowohl am Boden, wie auch an der Spitze des Turmes in 300 m Höhe Ozon gemessen. Diese Daten zeigen die gleiche Entwicklung. Innerhalb der Mischungsschicht ist die Ozonkonzentration im wesentlichen gleich groß, das Ozon also homogen verteilt. Übereinstimmend mit der in Abbildung 7.5 eingezeichneten Mischungsschichthöhe erkennt man in der Darstellung Abbildung 7.4, daß die Durchmischung schon um 8:00 UTC die Spitze des Frohnauer Turms in 346 m Höhe erreicht hat, während der Lidar Meßwert von 1200 m sich erst um 10:00 UTC dem Boden-

⁶ Berliner Luftgüte MEßnetz,

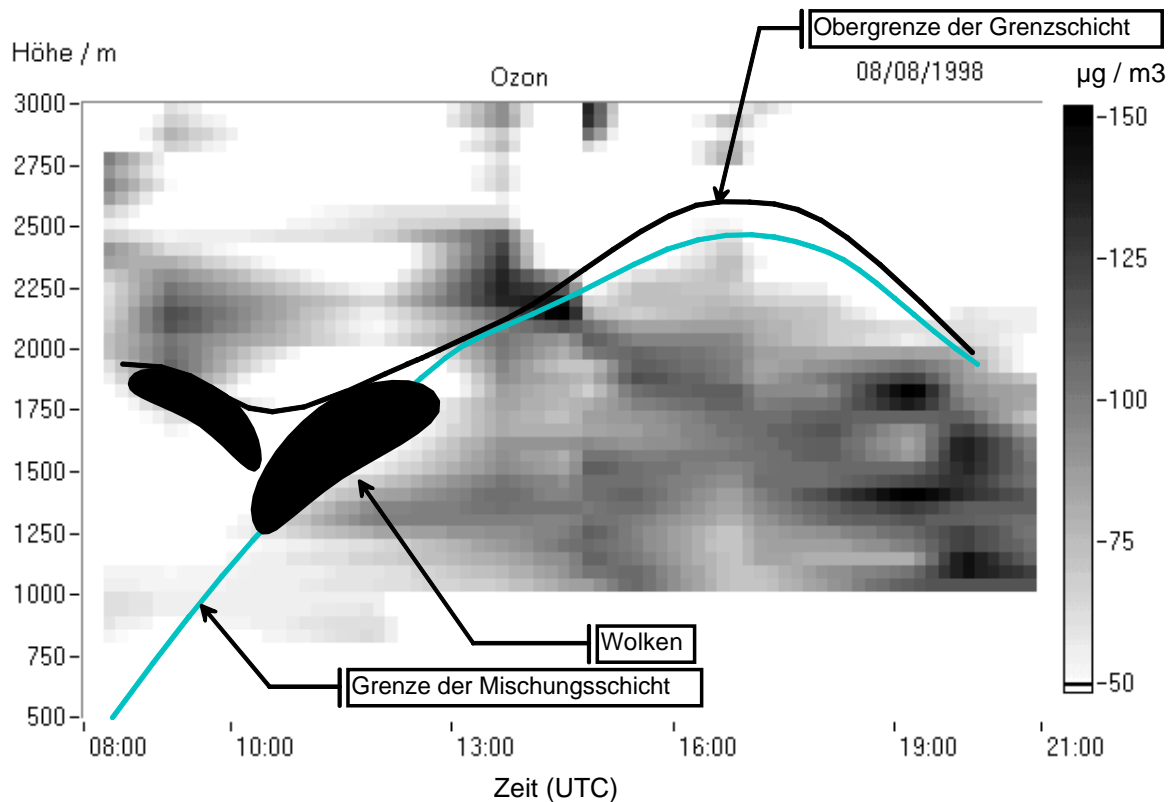


Abbildung 7.5 Ozonverteilung in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ am 8.8.98. Die aus den Aerosoldaten ablesbaren Grenzen der PBL und der Mischungsschicht wurden weiß, bzw. grün eingezeichnet. Die Ozonentstehung bleibt im wesentlichen auf die Mischungsschicht begrenzt.

wert angleicht. Es ist allerdings eine geringfügige Abnahme des Ozonmischungsverhältnisses mit der Höhe festzustellen, die durch die Messungen am Frohnauer Turm bemerkbar ist: an der Spitze des Turmes liegt der Ozonwert etwas tiefer als am Fuße. Dieser abnehmende Trend mit der Höhe setzt sich, wie aus den Lidardaten ersichtlich ist, fort.

Aus den Ozon-Vertikalmessungen (Abbildung 7.5) lassen sich noch weitere interessante Beobachtungen ablesen, die sich zunächst einer einfachen Interpretation entziehen. So tauchen vormittags oberhalb der Grenzschicht zweimal deutlich erhöhte Ozonwerte auf. Möglicherweise hängen diese mit dem Auftreten der Wolken und dem daraus resultierenden erhöhten Strahlungsfeld darüber zusammen.

Generell ist die Ozonkonzentration in der freien Troposphäre recht gering und es gibt keine Hinweise auf Ozonbildung in dieser Region. Am Nachmittag dringt ozonarme Luft etwa hundert Meter weit in die Grenzschicht ein. Wie schon die Aerosolmessungen, zeigen auch die Ozondaten keine Hinweise auf einen Austausch von Luft zwischen Grenzschicht und freier Troposphäre größeren Ausmaßes, so daß hier von einer stabilen Grenzschicht gesprochen werden kann, die gewissermaßen das Reaktionsgefäß für die Photochemie darstellt. Dieser Tag eignet sich von daher besonders gut für die Modellierung mit chemischen Transportmodellen (CTM).

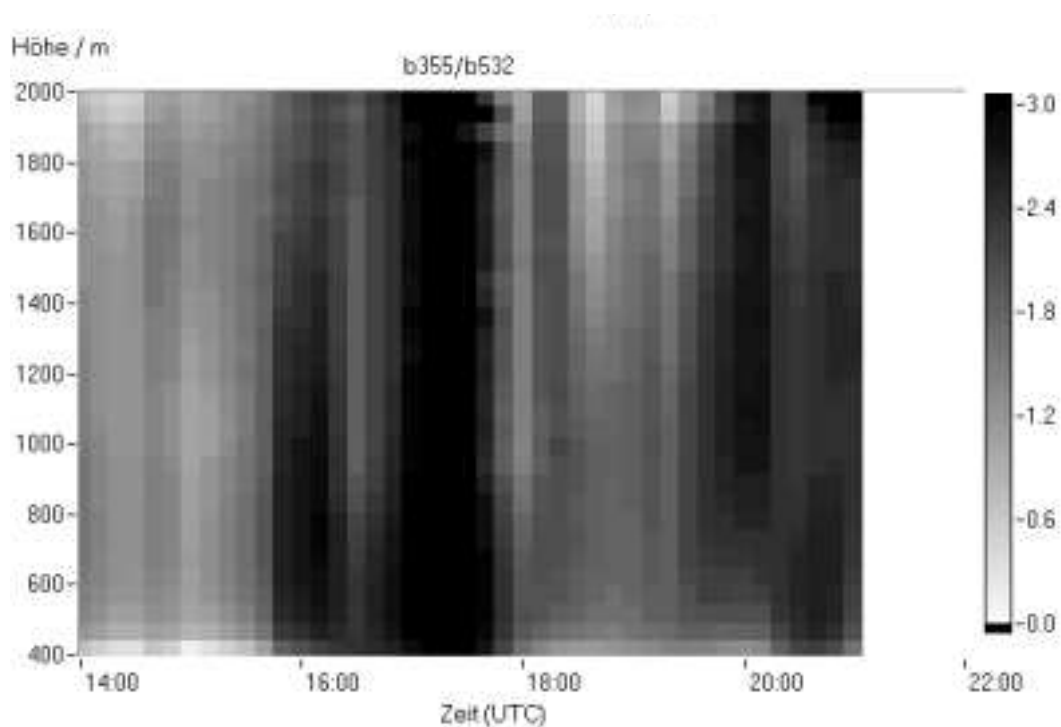


Abbildung 7.6 Verhältnis der Rückstreuung bei 355 nm zu der bei 532 nm (Angströmkoefizient). Während dieser Parameter mit der Höhe kaum variiert, verändert er sich deutlich im Laufe des Tages. Dies läßt darauf schließen, daß sich das Aerosol in Zusammensetzung und Partikelgröße mit der Höhe wenig, aber deutlich mit der Zeit verändert.

Bemerkenswert ist allerdings, daß die Ozonkonzentration nach Einbruch der Dunkelheit in der gesamten Grenzschicht weiter ansteigt und erst um 20:00 UTC (22:00 MESZ) ihr Maximum erreicht. Dieser Verlauf wird auch durch die Messung an der Spitze des Frohnauer Turms bestätigt. Am Boden brechen dort die Ozonwerte dagegen deutlich ein. Letzteres wird im Zusammenhang mit der in Kapitel 1.2 diskutierten Ozonchemie verständlich, da demnach der Erdboden selbst eine Senke für Ozon ist und zusätzlich das durch Verkehrsemissionen weiterhin zur Verfügung gestellte NO Ozon abbaut. Durch die zu diesem Zeitpunkt bereits ausgebildete Bodeninversion wird die obere Grenzschicht von diesen Abbauprozessen abgekoppelt, so daß das dort befindliche Ozon erhalten bleibt. Dies erklärt aber nicht einen weiteren Anstieg von O₃, das ohne Sonneneinstrahlung nicht weiter gebildet werden kann. Der Anstieg muß daher offensichtlich auf Transportprozesse zurückzuführen sein. Wir werden sehen, daß eine genauere Untersuchung der Aerosole Hinweise auf die Herkunft dieses Ozonmaximums gibt.

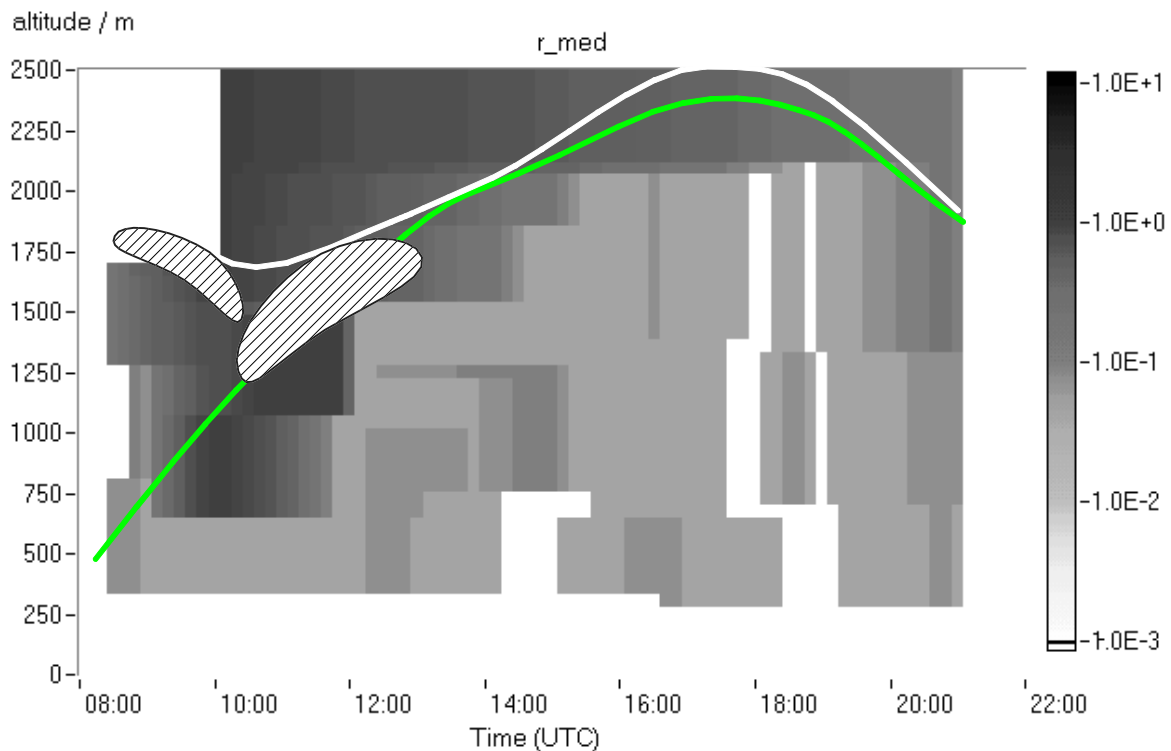


Abbildung 7.7 Medianwert der Aerosolgrößenverteilungen als Funktion der Zeit und der Höhe vom 8.8.98 in μm . Die Werte sind entlang der Zeitachse linear interpoliert. In der Höhenachse sind die untersuchten Höhenbereiche blockweise dargestellt. Die Werte oberhalb der Mischungsschicht und unterhalb der Wolken sind lediglich grobe Abschätzungen, da hier ein großer Meßfehler auftritt.

7.1.4 Aerosol-Größenverteilungen

In Abbildung 7.1 hatten wir die Aerosole anhand ihres Rückstreuungskoeffizienten bei 532 nm dargestellt und die Grenzschicht damit gut erkennen können. Der RSK ist ein Maß für die Gesamtmenge an Aerosol, das dabei nicht näher spezifiziert wird. In diesen Daten deutet sich bereits an, daß das Aerosol im Tagesverlauf Schwankungen ausgesetzt ist. Dieses wird noch viel deutlicher, wenn man die Rückstreuung bei 355 nm hinzu nimmt und die Werte miteinander in Beziehung setzt. In Abbildung 7.6 ist der Angströmkoefizient ($A = \ln(\beta_{355}/\beta_{532}) / \ln(532/355)$) bei diesen beiden Wellenlängen dargestellt. Diese Größe hängt nun nicht mehr von der Aerosolmenge ab, sondern nur noch von den partikelspezifischen Streueigenschaften. Man erkennt, daß sich diese deutlich verändern. Dies kann zum einen daran liegen, daß die vorhandenen Teilchen Zustands- oder Größenänderungen unterworfen sind, oder daß andere Partikel entweder durch den Wind oder direkt von den Quellen ins Blickfeld gerückt werden.

Dies kann nun mit dem in Kapitel 5 beschriebenen Verfahren näher untersucht werden. Dazu wird die Grenzschicht und darüberliegende Schichten in mehrere Regionen unterteilt, für die dann jeweils anhand der gemessenen und gemittelten Streukoeffizienten ein geeignetes Aerosolmodell gesucht wird. Als Ergebnis erhält man den Medianwert der Größenverteilung und mit Hilfe des Brechungsindex die Zusammensetzung des Aerosols. Diese

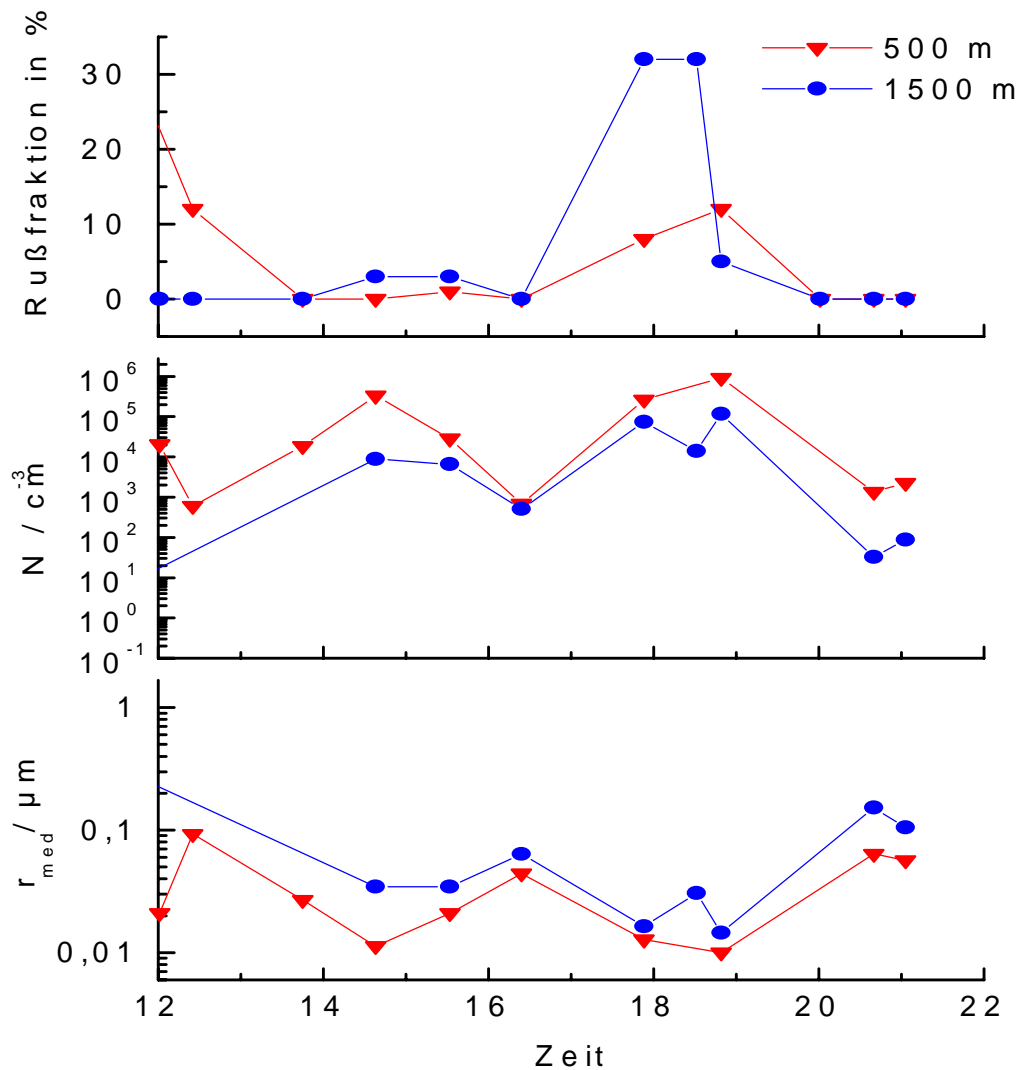


Abbildung 7.8 Rußgehalt, die Gesamtanzahlkonzentration und der Medianwert der Aerosol-Größenverteilungen vom 8.8.98 als Funktion der Zeit für jeweils zwei Höhenbereiche, 500 m und 1500 m

Höhenunterteilung wird in der Regel so vorgenommen, daß man ein bis drei Höhenbereiche innerhalb der Grenzschicht analysiert und einen weiteren an der Grenzschichtkante. Oberhalb der Grenzschicht ist die Aerosolstreuung so gering, daß eine große Ungenauigkeit bei der Analyse entsteht und daher keine zuverlässigen Aussagen gewonnen werden können.

Ein Ergebnis dieser Analyse ist in Abbildung 7.7 dargestellt, die den Medianwert der angepaßten Größenverteilungen zeigt. Man erkennt in dieser Darstellung, daß sich der Median des Aerosols innerhalb der Mischungsschicht im Bereich zwischen 0,01 und 0,1 μm bewegt. Das Aerosol wird also primär aus Partikeln der Kondensations- oder Akkumulationsmode gebildet, wie man das in einer urbanen Umgebung auch erwartet und schwankt zwi-

schen diesen beiden Moden, mit einer Tendenz zu zunehmender Dominanz der kleineren Kondensationsmode im Verlauf des Tages.

Die Ergebnisse sind für zwei ausgewählte Höhenbereiche um 500 m und 1500 m in Abbildung 7.8 ausführlich dargestellt. Die Mischungsschicht erreicht die 1500 m Grenze etwa um 12:00 UTC, so daß innerhalb des auswertbaren Bereiches beide Kurven innerhalb der durchmischten PBL liegen. Man kann darin zwischen zwei Aerosoltypen unterscheiden, die im Folgenden als urban und rural bezeichnet werden. Der urbane Typ4 zeigt sich sehr ausgeprägt zwischen 18:00 und 19:00 UTC und zeichnet sich durch einen kleinen Median im Bereich zwischen 10 und 20 nm, einer hohen Anzahlkonzentration um die 10^5 cm^{-3} und einem hohen Anteil an Ruß aus. Nach 20:00 finden wir andere Parameter, die auf einen ruralen Typ hinweisen, es besitzt einen Median im Bereich von 100 nm, N liegt im Bereich von 100 bis 1000 cm^{-3} und Ruß wird in diesem Aerosol nicht gefunden.

Im Folgenden wollen wir die beiden eben definierten Beschreibungen, urban und rural, zur Charakterisierung des Aerosols beibehalten. Auch wenn die beschriebenen Parameter nicht immer so deutlich ausgeprägt sind, kann man das Aerosol vom 8.8.98 zu jedem Zeitpunkt dem einen oder dem andern Typus in der folgenden Weise zuordnen. Interessant ist dabei insbesondere, diese Klassifizierung mit den gemessenen Ozonwerten (Abbildung 7.5) in Beziehung zu setzen:

- Das Aerosol zeigt zunächst (12:00) einen überwiegend ruralen Charakter, der sich zunehmend zu einem urbanen hin verschiebt. Um 15:00 überwiegen dann bereits die urbanen Merkmale.
- Um ca. 16:30 UTC schwenkt der Charakter des Aerosols plötzlich von urban nach kontinental. Dieses Ereignis koinzidiert mit einem kurzfristigem Rückgang des Ozons. Die ursprünglichen Verhältnisse werden aber kurz darauf wieder hergestellt.
- Eine deutliche Signatur urbanen Aerosols in der oberen Grenzschicht um 18:00 UTC. Gleichzeitig geht die Ozonkonzentration dort zurück.
- Etwa um 20:00 UTC tritt ein erneuter Einbruch kontinentalen Aerosols in der gesamten Grenzschicht ein, der bis zum Ende des Beobachtungszeitraumes um 22:00 UTC anhält. Besonders auffällig ist hier ein zeitgleich auftretendes Ozonmaximum in der oberen Grenzschicht.

Die letzten beiden Ereignisse sind also von einer deutlichen Antikorrelation von Ozon und urbanem Charakter des Aerosols gekennzeichnet. Bei dem Auftreten des ruralen Typs um 16:00 UTC dagegen korrelieren diese Kenngrößen. In Abbildung 7.9 ist zur Verdeutlichung dieses Zusammenhangs der aus den Lidardaten abgeleitete Rußgehalt der Luft als Indikator für urbanes Aerosol und die Ozonkonzentration in der Höhe von 1000 m dargestellt.

Diese Entwicklung läßt sich im Rahmen der Photochemie gut interpretieren. In dem zuerst aufgeführten Fall um 16:30 erleben wir offenbar den Einbruch einer wenig vorbelasteten Luftmasse, die durch rurales Aerosol und geringeren Ozongehalt gekennzeichnet ist. Diese wird dann insbesondere in der oberen Grenzschicht schnell wieder durch urbane Luft ersetzt. Da diese in ihrer Zusammensetzung stark von den Emissionsquellen geprägt ist und daher ein hohes $[\text{NO}] / [\text{NO}_2]$ -Verhältnis aufweisen dürfte, ist die niedrige Ozonkonzentration, die zu diesem Zeitpunkt beobachtet wird, verständlich.

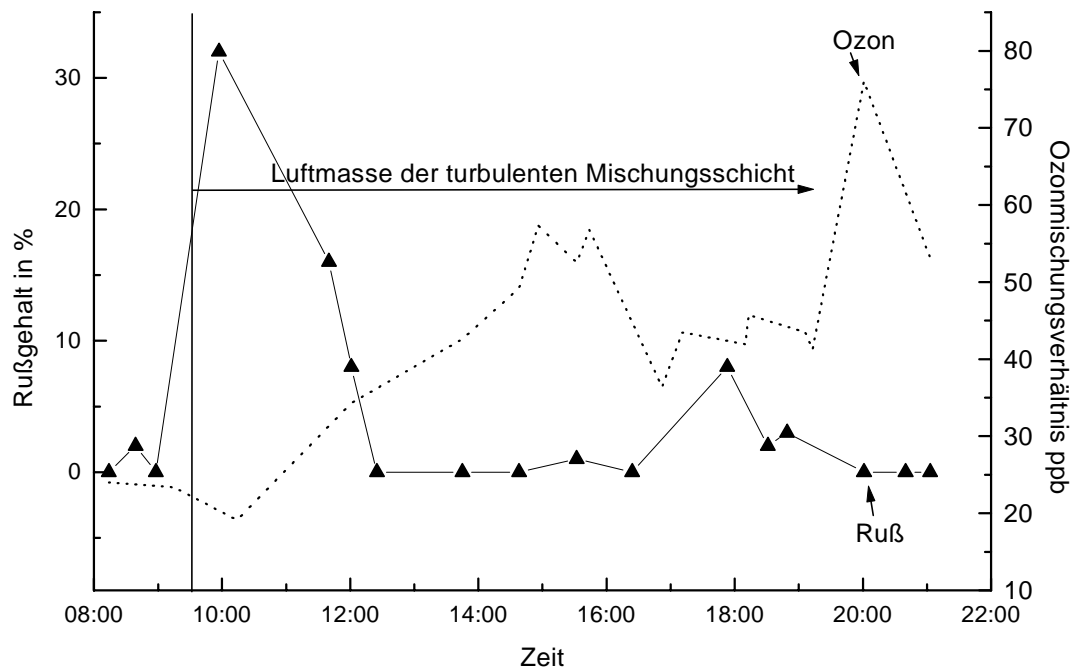


Abbildung 7.9 Ozon- und Rußgehalt am 8.8.98 in 1000 m Höhe. Markiert ist der Zeitraum, in dem sich die beobachtete Luftmasse innerhalb der turbulenten Mischungsschicht befindet. In diesem Bereich antikorreliert die Ozonkonzentration mit dem Rußgehalt, den man als Tracer für urbane, also emissionsgeprägte Luft auffassen kann.

Am Abend dann geht der Einfluß der Emissionen zurück und das Aerosol verliert seinen urbanen, so daß hier ein rurales Aerosol sichtbar wird, wie man es auch in größerer Entfernung von den Emissionsquellen feststellen kann. Diese Interpretation wird durch eine Aerosolmessung, die während eines Meßfluges nordöstlich von Berlin an diesem Tag durchgeführt wurde, gestützt. Mit einem Partikelzähler wurden dort Teilchen mit $r > 0,3 \mu\text{m}$ gemessen. Das Ergebnis ist in Abbildung 7.10 dargestellt. Der Vergleich dieser Meßergebnisse mit den aus den Lidardaten berechneten Werten bedarf allerdings einer genaueren Bewertung:

Wir hatten in Kapitel 5 festgestellt, daß die Aerosolgrößenverteilung mit Hilfe des hier als ASD-Methode bezeichneten Verfahrens nicht korrekt in ihrem Verlauf wiedergegeben werden kann. Lediglich die Mode, die die optischen Eigenschaften bestimmt, wird erkannt, sofern eine solche eindeutig existiert. Im Falle eines Aerosols, das von der Aitken- (oder Kondensations-) Mode dominiert wird, wie es für den urbanen Typ der Fall ist, werden daher die größeren Partikel "übersehen". Während der Partikelzähler nur die großen Teilchen detektiert, sieht das Lidar nur die kleinen. Die beiden Meßverfahren messen also unterschiedliche Dinge. Werden die anhand der Lidarmessung gefundenen, monomodalen

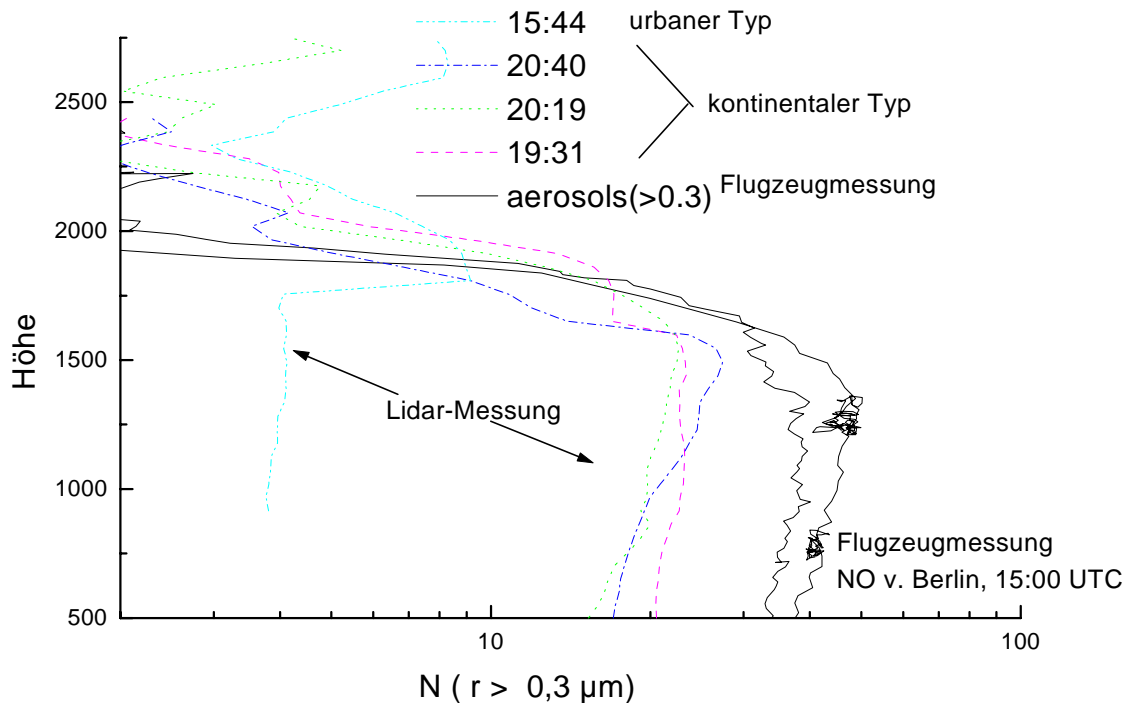


Abbildung 7.10 Vergleich der Teilchenanzahlkonzentrationen von Lidar und In-Situ-Messungen. Das Meßflugzeug trug einen Partikelzähler ("Forward-scattering-probe") der alle Partikel mit $r > 0,3 \mu\text{m}$ erfaßt (durchgezogene Linie). Mit Hilfe des LASD-Verfahrens erhält man aus den Lidardaten Größenverteilungen, aus denen sich die gleiche Kenngröße errechnen läßt (durchbrochene Linien).

Größenverteilungen dazu verwendet, die obige Kenngröße $N(r > 0,3 \mu\text{m})$ zu berechnen, so ist zu erwarten, daß diese Angabe sehr ungenau ist und die Anzahl der großen Partikel deutlich unterschätzt wird.

Im Falle eines ruralen Aerosols, in dem die Akkumulationsmode, also Partikel mit einem Radius um die $0,1 \mu\text{m}$, besonders hervortritt, ist dagegen zu erwarten, daß die Kenngröße $N(r > 0,3 \mu\text{m})$ vom Lidar relativ gut erfaßt werden kann, weil in diesem Fall gerade diese Partikel erheblich zu den optischen Eigenschaften des Aerosols beitragen. Da aber auch hier wieder die großen Partikel (die Dispersionsmode) vernachlässigt werden, ist auch in diesem Fall von einer, wenn auch geringen, Unterschätzung von $N(r > 0,3 \mu\text{m})$ auszugehen. Unter diesem Blickwinkel ist der Vergleich der Daten des Partikelzählers mit den Lidardaten in Abbildung 7.10 zu bewerten.

Der Wind weht zum Zeitpunkt der Messung aus Südwest bis West. Das Flugzeug befindet sich nordöstlich von Berlin, also in der Abluffbahn der Stadt. Über der Charité wird unterdessen nach der obigen Klassifikation urbanes Aerosol detektiert. Nach den oben ausge-

fürten Argumenten ist von daher nicht mit einer Übereinstimmung der Meßergebnisse von Lidar und Partikelzähler zu rechnen. Am Abend jedoch läßt der Einfluß der städtischen Emissionen auf das Aerosol nach und die Akkumulationsmode wird sichtbar. Hier ist dann eine bessere Übereinstimmung mit den Daten des Partikelzählers auf dem Flugzeug zu erwarten. Dies ist, wie aus Abbildung 7.10 ersichtlich ist, auch der Fall.

Sicherlich ist dieser Vergleich sehr indirekter Art und daher mit Vorsicht zu genießen, dennoch entsprechen die Ergebnisse den Erwartungen. Das legt nahe, daß das hier verwendete Verfahren zur Herleitung von Aerosoleigenschaften plausible Ergebnisse liefert. Es wird darüber hinaus ersichtlich, daß die Stadt einen unmittelbaren Einfluß auf das Aerosol, insbesondere auch auf deren optische Eigenschaften ausübt. Offensichtlich spielt Ruß dabei eine wichtige Rolle. Daneben zeigt die Dominanz der Kondensationsmode im urbanen Aerosoltyp an, daß homogene Nukleationsprozesse für das städtische Aerosol in Betracht zu ziehen sind.

Bemerkenswert ist, daß sich am Abend der urbane Charakter des Aerosols sehr schnell verliert. Dies kann durch Advektion geschehen, es besteht aber auch die Möglichkeit, daß durch mikrophysikalische Prozesse, wie Koagulation, und durch chemische Umwandlung die Partikel verändert werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß mit Hilfe eines polychromen Rückstreulidars ein Einblick in die Struktur und Dynamik der Grenz- und Mischungsschicht gewonnen werden kann. Mit der kombinierten Aerosol- und Ozonmessung können neben der photochemischen Bildung von Ozon auch Transportprozesse beobachtet und bewertet werden. Mit Hilfe der ASD-Auswertung kann nun zusätzlich auch eine genauere Charakterisierung der Luftmassen und Rückschlüsse auf deren Herkunft und Zustand gewonnen werden. Diese Möglichkeit erhält man durch den Vergleich der Rückstreuung und der Extinktion bei verschiedenen Wellenlängen, die die entsprechenden Signaturen in sich tragen. Als besonders wertvoll erweisen sich für diese Form der Auswertung die direkte Messung der Extinktion mit Hilfe der Raman-Streuung, sowie das zusätzlich mit dem DIAL-Klett-Verfahren gewonnene Aerosol-Rückstreusignal bei der Wellenlänge von 286.4 nm.

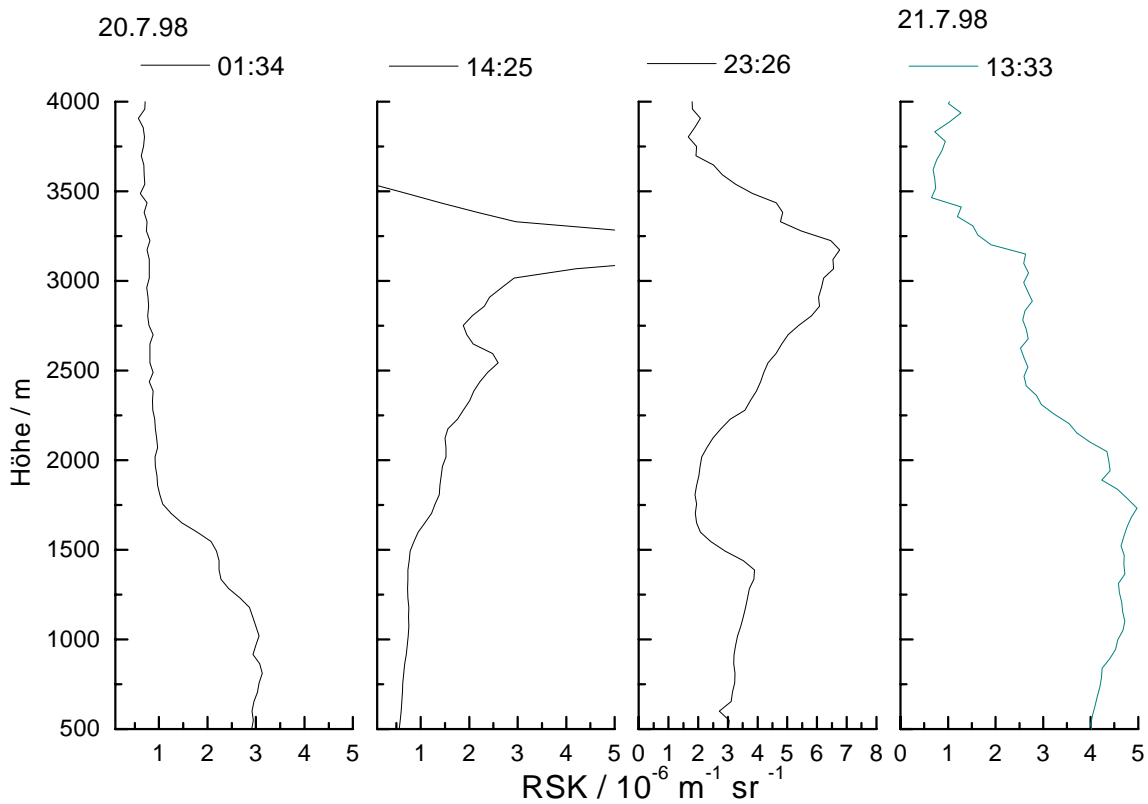


Abbildung 7.11 RSK bei 532 nm am 20. und 21.7.98. Die Grenzschichthöhe, die morgens noch bei ca. 1700 m lag, dehnt sich später bis 3500 m aus. Nachts grenzt sich die PBL wieder in ca. 1500 m Höhe ab, eine Aerosolschicht bleibt in der Höhe zurück, die auch am nächsten Tag sichtbar bleibt.

7.2 Eine instabile Grenzschicht: Die Intensivmeßzeit 20.-21.Juli 1998

In dem Beispiel des vorigen Abschnitts konnte man eine klar ausgeprägte Grenzschicht sehen, mit einer Mischungsschicht, die sich ebenfalls den Erwartungen gemäß ausbildete. Daß die Verhältnisse nicht immer so übersichtlich sind, zeigt das folgende Beispiel. Dabei handelt es sich um die Daten der ersten BERLIOZ-Intensivmeßperiode, die am 20. und 21.7.98 stattfand. Ozonmessungen liegen in diesem Zeitraum vom 19.7, 16:30 UTC bis 21.7. 18:15 UTC durchgängig vor. Leider konnten zu diesem Zeitpunkt keine simultanen Aerosol-Messungen durchgeführt werden, so daß nur sporadisch Aerosolprofile aufgezeichnet wurden. Auf eine ausführliche Datenanalyse, wie im vorigen Beispiel, muß aus diesem Grund verzichtet werden.

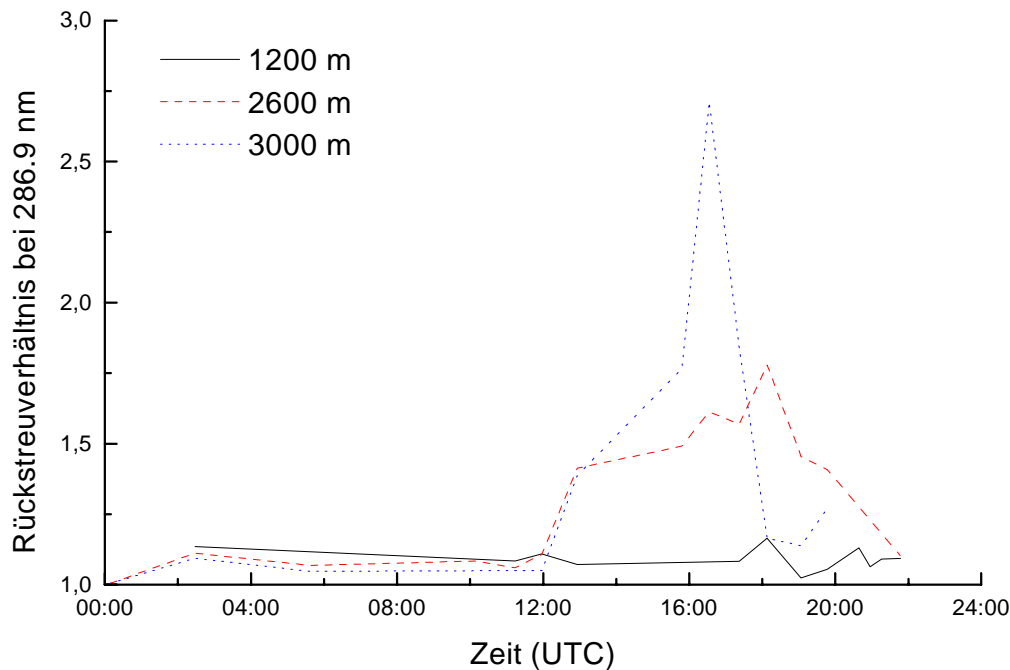


Abbildung 7.12 Rückstreuverhältnisse bei 286.4 nm, die mit dem DIAL-Klett-Verfahren gewonnen wurden. Man sieht das sehr plötzliche Auftreten einer stark streuenden Schicht, die bis über 3000 m Höhe reicht.

7.2.1 Die Grenz- und Mischungsschicht

Die meteorologische Situation am 20.7. unterscheidet sich gegenüber der des 8.8 unter anderem durch ein anderes Windfeld. Dies zeigt sich in Abbildung 7.13 besonders deutlich in den Radiosondendaten von 12:00 UTC. An der Oberkante der Grenzschicht, die zu diesem Zeitpunkt bei 1500 m liegt, zeigt sich eine deutliche Windscherung. Während der Wind in der Grenzschicht aus Südost (ca. 130°), der "BERLIOZ"-Richtung, weht, dreht er in 1500 m Höhe recht abrupt auf Richtung Südsüdwest und mit zunehmender Höhe auf West (270°), die Mischungsschicht wird zu diesem Zeitpunkt von einer Temperaturinversion begrenzt.

Die Struktur der Grenzschicht ändert sich im Laufe des Tages gravierend. Morgens (3:00 UTC) zeigt sich wieder eine strukturierte, also nicht durchmischte Grenzschicht, die sich aufgrund ihres Aerosolgehalts klar von der freien Troposphäre abhebt (Abbildung 7.11). Das Manko, daß an diesem Tag keine kontinuierlich laufende TAD-Messung durchgeführte wurde, kann dadurch kompensiert werden, daß man die mit Hilfe des DIAL-Klett-Verfahrens erzielten Aerosol-Rückstreuprofile bei 286.4 nm statt dessen heranziehen kann (Abbildung 7.12). Darin erscheint um 12:56 eine sehr massive Aerosolschicht oberhalb der bis dahin existierenden Grenzschicht, die sich nun offenbar bis etwa 3000 m Höhe erstreckt. Dies wird um 14:25 auch mit dem Aerosol-Lidar detektiert (Abbildung 7.11). Zu diesem Zeitpunkt bilden sich Wolken an der Oberkante dieser Schicht. (Die TAD-Signale sind daher nicht quantitativ auswertbar). Diese Schicht bleibt sehr lange erhalten und läßt sich auch am nächsten Tag noch nachweisen (Abbildung 7.11).

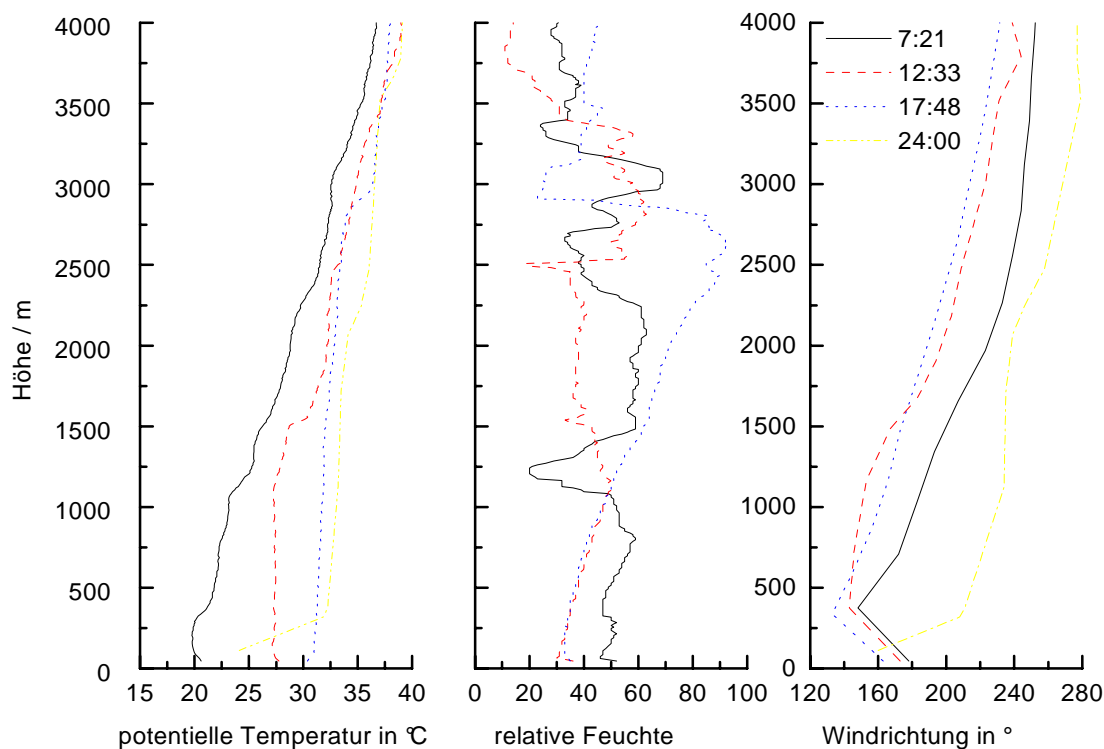


Abbildung 7.13 Radiosondendaten aus Tempelhof vom 20.7.98. (BERLIOZ-Daten). Die Profile der potentiellen Temperatur zeigen, daß die Mischungsschicht, die um 12:33 noch von einer Inversion in 1500 m Höhe abgeschlossen wurde, am Abend bis 3000 m Höhe ausgedehnt war.

Interessant ist nun die Frage, ob es sich hier um eine aerosolbeladene, "fremde" Luftmasse handelt, die von dem Scherwind herantrogen und auf die Grenzschicht aufgelaufen ist oder ob hier vielmehr ein Instabilität der PBL beobachtet wurde, die zu einem plötzlichen Aufbruch der Inversion und einer Ausdehnung der Mischungsschicht auf über 3000 m Höhe führt. Auch wenn die erste These durch das Auftreten des Scherwindes gestützt und daher auch von einigen BERLIOZ-Mitarbeitern bevorzugt wird [mündliche Diskussion], scheinen mir doch alle Indikatoren auf letzteres hinzudeuten.

Aus den RSK-Werten bei 286.4 nm wird deutlich, daß die Schicht oberhalb 1700 m sehr plötzlich zwischen 11:15 und 11:45 aufgetreten ist. Obwohl das Aerosol in dieser Strömungsschicht nicht gleichmäßig verteilt ist, lassen sich auch keine klaren Grenzen ausmachen. Die auftretenden Maxima (Abbildung 7.11) lassen vielmehr auf beginnende Wolkenbildungsprozesse schließen. Erst in der Nacht grenzt sich die obere Schicht von der unteren deutlich ab. Auch die Radiosondendaten von 18:00 legen nahe, daß die untere Troposphäre bis 3000 m instabil geschichtet war (Abbildung 7.13). Eine Bestimmung der Grenzschichthöhe anhand der Radiosondendaten ist nicht ohne weiteres möglich, da der Verlauf der Isobaren hieraus nicht abgelesen werden kann. Es wird aber auch mit Hilfe der Lidar-Messung klar, daß die Grenzschicht zunächst bei 1700 m Höhe endet, dann auf ca. 3000 m ansteigt - der Verlauf der potentiellen Temperatur um 18:00 verdeutlicht dies - und nachdem die Turbulenz nachts nachläßt, wieder auf die 1700 m Marke zurückkehrt. Dabei werden große Menge Aerosol in der darüberliegenden Schicht zurückgelassen.

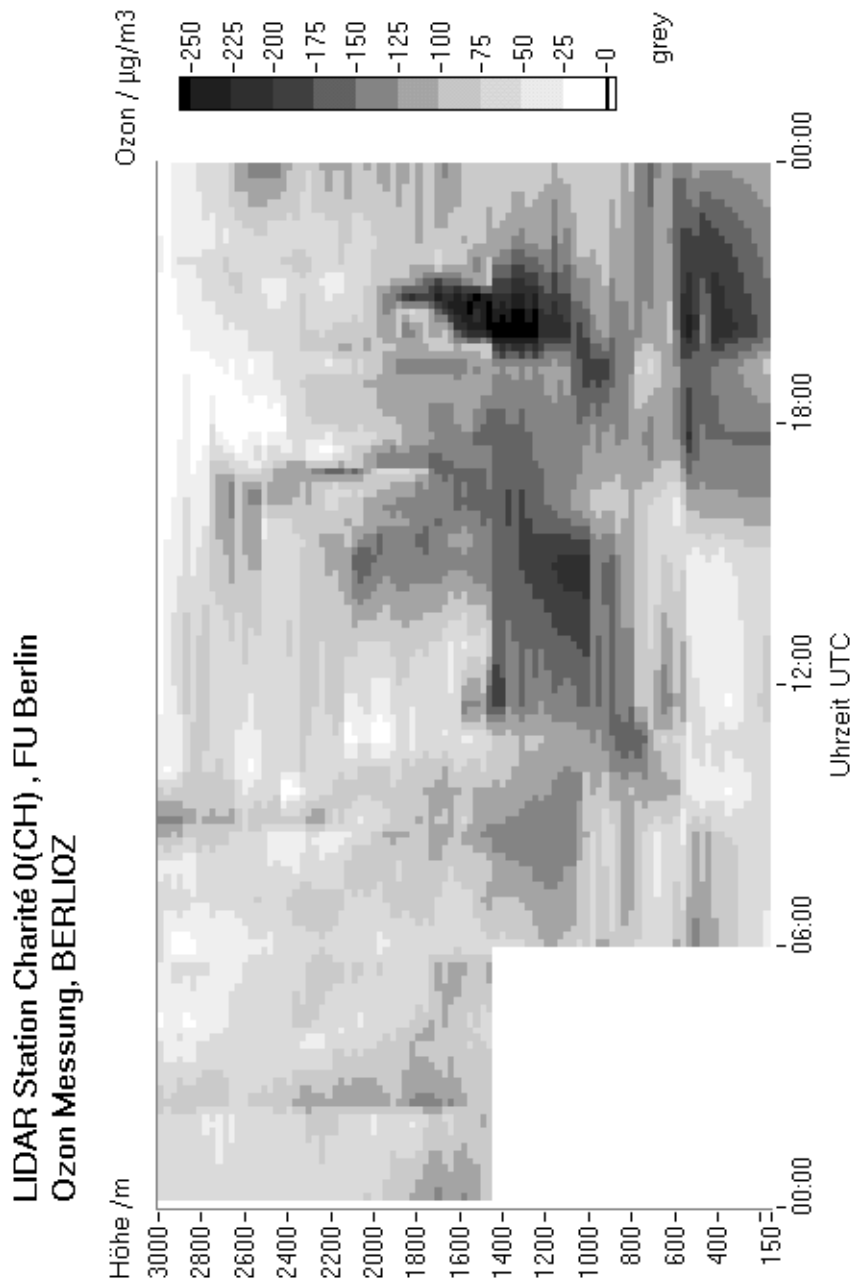


Abbildung 7.14 DIAL- Ozon Vertikalprofile vom 20.7.98. Deutlich ist ein Einmischen des Ozons aus der Grenzschicht in die darüberliegende Strömung oberhalb von 1500 m zu erkennen.

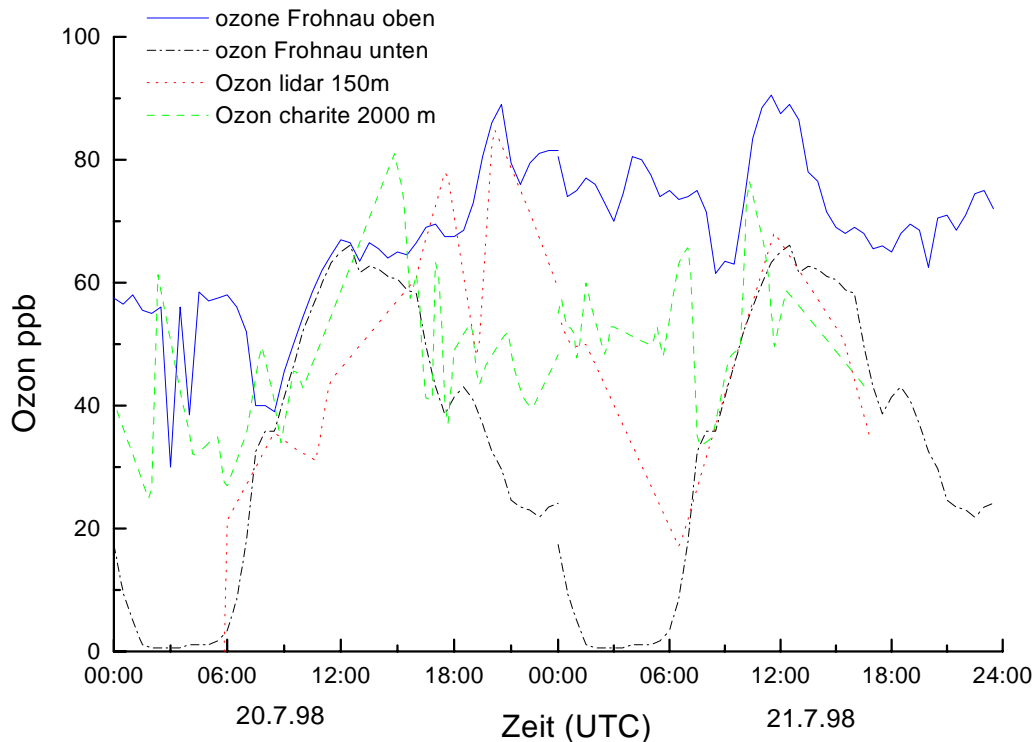


Abbildung 7.15 Vergleich der Lidar-Ozon-Daten mit den von BLUME am Frohnauer Turm gemessenen Werten für den 20. und 21. 7. 98.

7.2.2 Ozon

Sehr deutlich ist das Aufbrechen der Temperaturinversion und der Anstieg der Grenzschicht um die Mittagszeit auch in der Ozonverteilung zu erkennen (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). In der oberen Grenzschicht bildet sich gegen Mittag eine hohe Ozonkonzentration aus, die zunächst nach oben durch die Inversion begrenzt bleibt. Diese Barriere bricht offensichtlich zwischen 12:00 und 14:00 UTC auf und das Ozon verteilt sich relativ gleichmäßig über die gesamte Mischungsschicht, die nun bis 3000 m Höhe reicht.

Auffällig ist im weiteren Verlauf des Tages das Auftreten sehr hoher Ozonkonzentration nach Einbruch der Dunkelheit, ganz ähnlich, wie es auch am 8.8. (voriger Abschnitt) beobachtet wurde. Eine Analyse der Luftmasse ist wegen fehlender Aerosoldaten hier jedoch nicht möglich. Es scheint sich hierbei offensichtlich um eine, für Sommersmogbildung typische Erscheinung zu handeln.

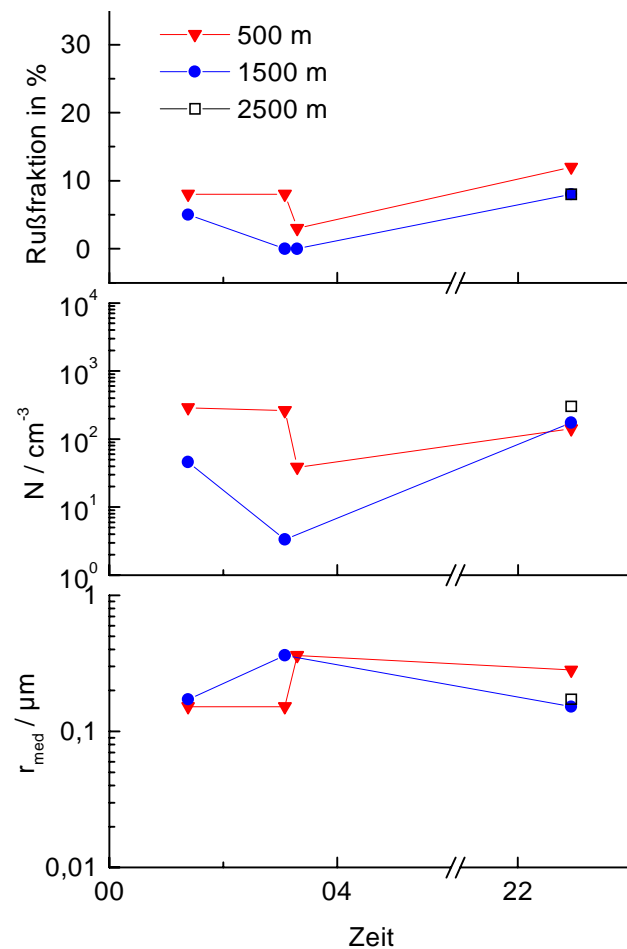


Abbildung 7.16 Ergebnisse der ASD-Auswertung für den 20.7.98

7.2.3 Aerosol-Größenverteilungen

Die in Abbildung 7.16 dargestellten Resultate der ASD-Auswertung weisen ebenfalls darauf hin, daß am 20.7. urbane Luft bis in 3000 m Höhe aufsteigen konnte. Die Auswertung für die dort vorgefundene Aerosolschicht um 23:00 UTC ergeben dieselben Resultate, wie man es für das Aerosol in der Grenzschicht erhält. Insgesamt hat das gemessene Aerosol einen überwiegend ruralen Charakter, was vor allem daran liegen wird, daß tagsüber keine Meßergebnisse vorliegen und sich nachts wegen geringer Emission - wie es auch schon am 8.8. festgestellt wurde - die urbanen Merkmale nicht durchsetzen. Der Rußgehalt von 8% in beiden Fällen deutet aber auf den urbanen Ursprung der Partikel hin.

Insgesamt ergibt sich damit für diesen, für die BERLIOZ-Kampagne sehr wichtigen Tag, die Situation, daß die urbanen Emissionen bis in höhere Luftschichten eindringen konnten. Die dort beobachtete Windscherung dürfte zu einer breiten Verteilung der Abluftfahne führen, die so den Beobachtungen abwindig gelegenen, bodengebundenen Meßstationen teilweise entgehen. Dies ist bei der Auswertung und Modellierung des BERLIOZ-Datensatzes mit chemischen Transportmodellen zu berücksichtigen.

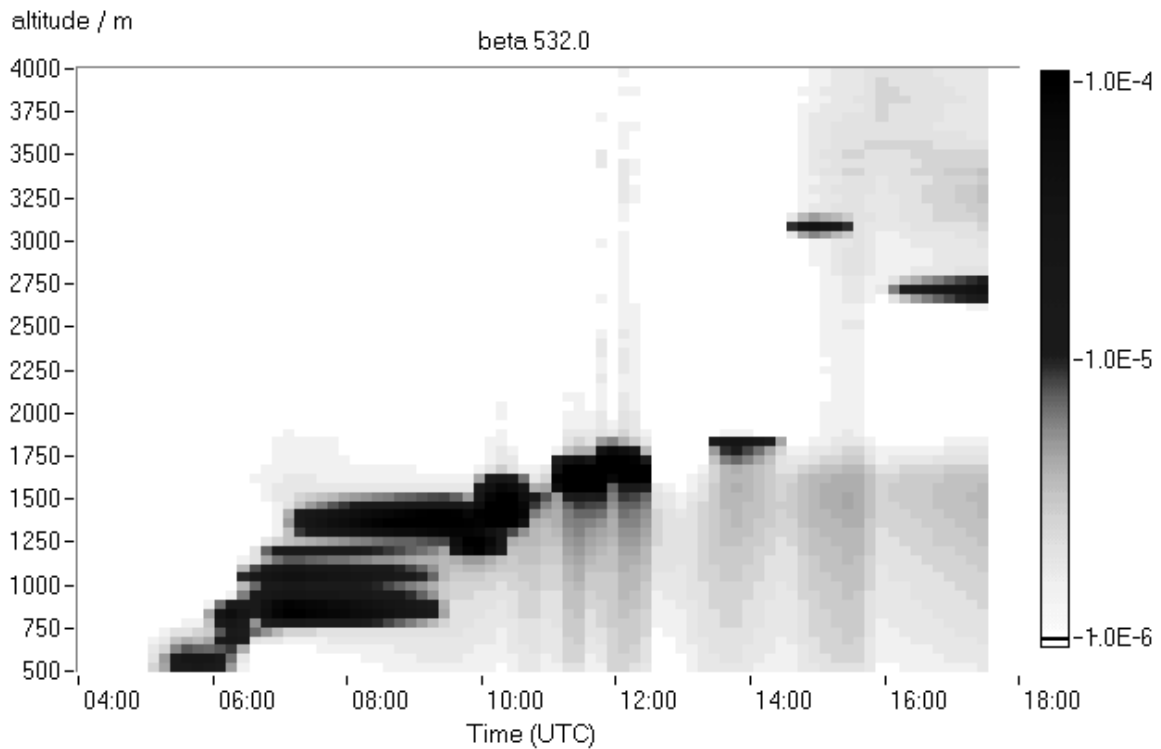


Abbildung 7.17 Aerosolrückstreuung am 6.8.98. Deutlich ist die Entwicklung der Mischungsschicht zu erkennen, die am Vormittag ständig von Wolkenbildung begleitet wird.

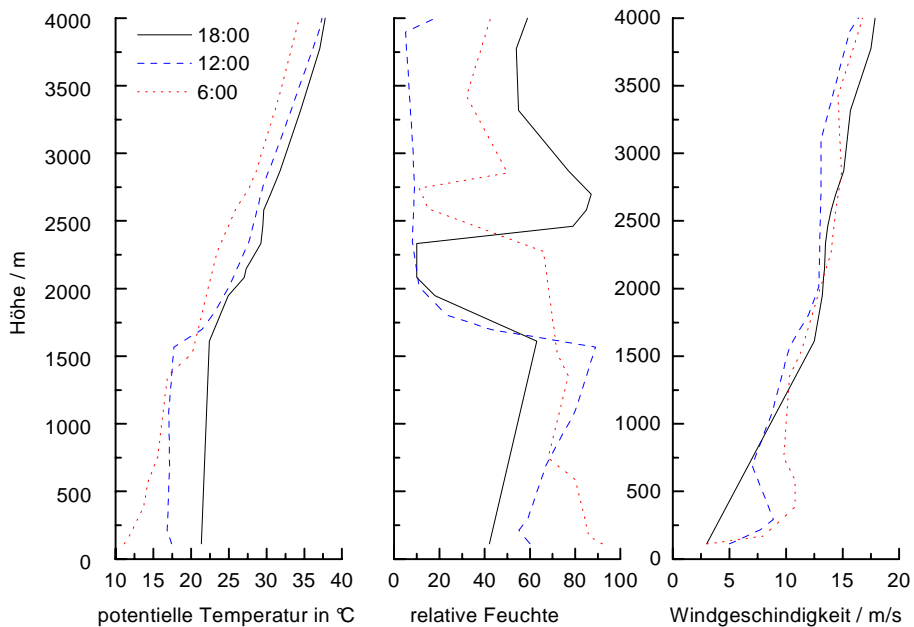


Abbildung 7.18 Radiosondendaten vom 6.8.98 aus Lindenberg. Die Grenzschichthöhe bleibt stabil bei 1500 m, mittags ist die Luft oberhalb der PBL ungewöhnlich trocken.

7.3 Qualitätssicherung: der 6. August 1998

Wie ich in dem einleitenden Kapitel (1.3) über die BERLIOZ-Kampagne bereits erwähnt habe, wurden alle an diesem Experiment teilnehmenden Meßgeräte einem Qualitätstest unterzogen. Für das DIAL auf der Charité bedeutet das konkret, daß an einem Tag ein mit einem kalibrierten Ozonmeßgerät ausgestattetes Meßflugzeug des Instituts für Umweltforschung (IfU, Garmisch) unter der Leitung von Dr. Mohnen direkt über dem Lidar im Spiralflug Höhenprofile aufzeichnete. Der Qualitätstest gilt als erfolgreich, wenn die DIAL-Profile über dem gesamten Höhenintervall innerhalb eines Toleranzbereiches von 20% mit der Flugzeugmessung übereinstimmen.

Am 6.8.98 fanden zwei Überflüge statt, der erste zwischen 11:44 und 12:19 und der zweite zwischen 15:00 und 15:30 UTC. In dieser Zeit wurden mit dem DIAL-System Ozonprofile im Scan-Betrieb gemessen. Die Ergebnisse stelle ich weiter unten vor. Die meteorologische Situation ist auch an diesem Tag sehr interessant, so daß ich die Vorgehensweise der zuvor dargestellten Meßtage beibehalten und zunächst die Grenzschicht- und Aerosolsituation darstellen möchte. Bemerkenswert sind an diesem Tag insbesondere die Ereignisse, die sich oberhalb der Grenzschicht abspielen.

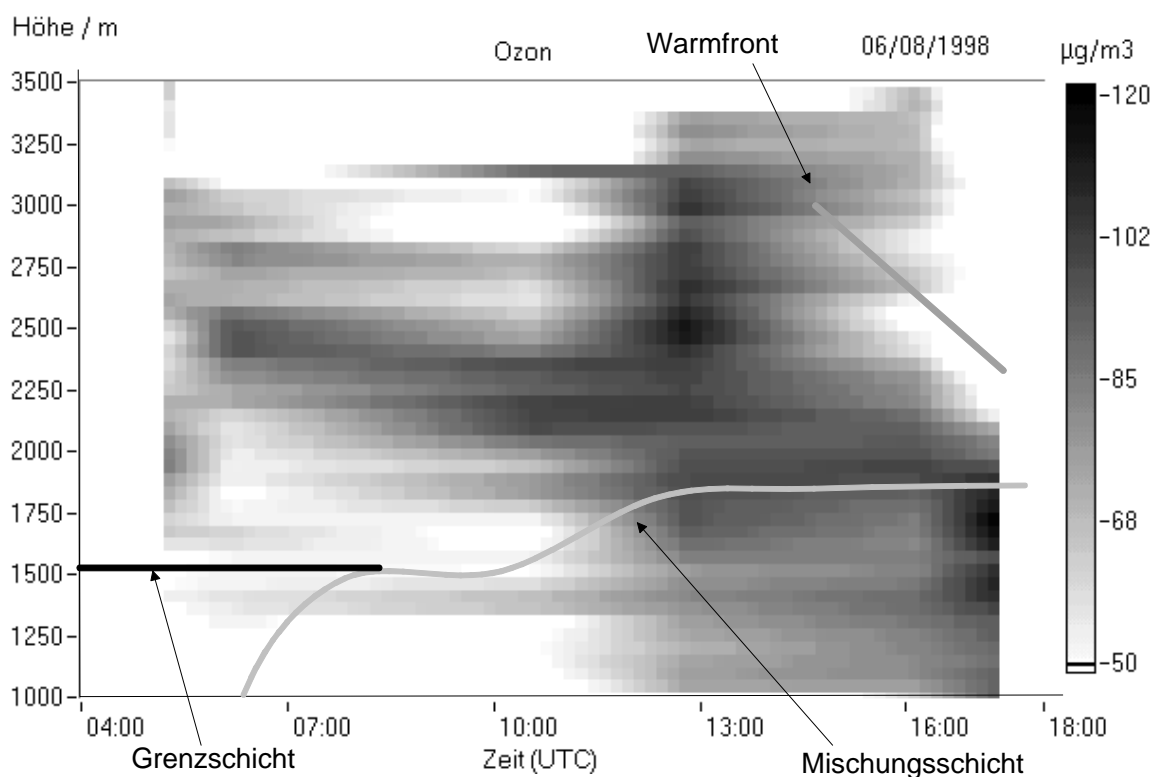


Abbildung 7.19 Ozonverteilung am 6.8.98. Die weiße Linie zeigt die Obergrenze der PBL an. Die gelbe Linie markiert die untere Grenze der Schicht, die am Nachmittag Berlin überquert und offensichtlich die ozonhaltige Luft verdrängt.

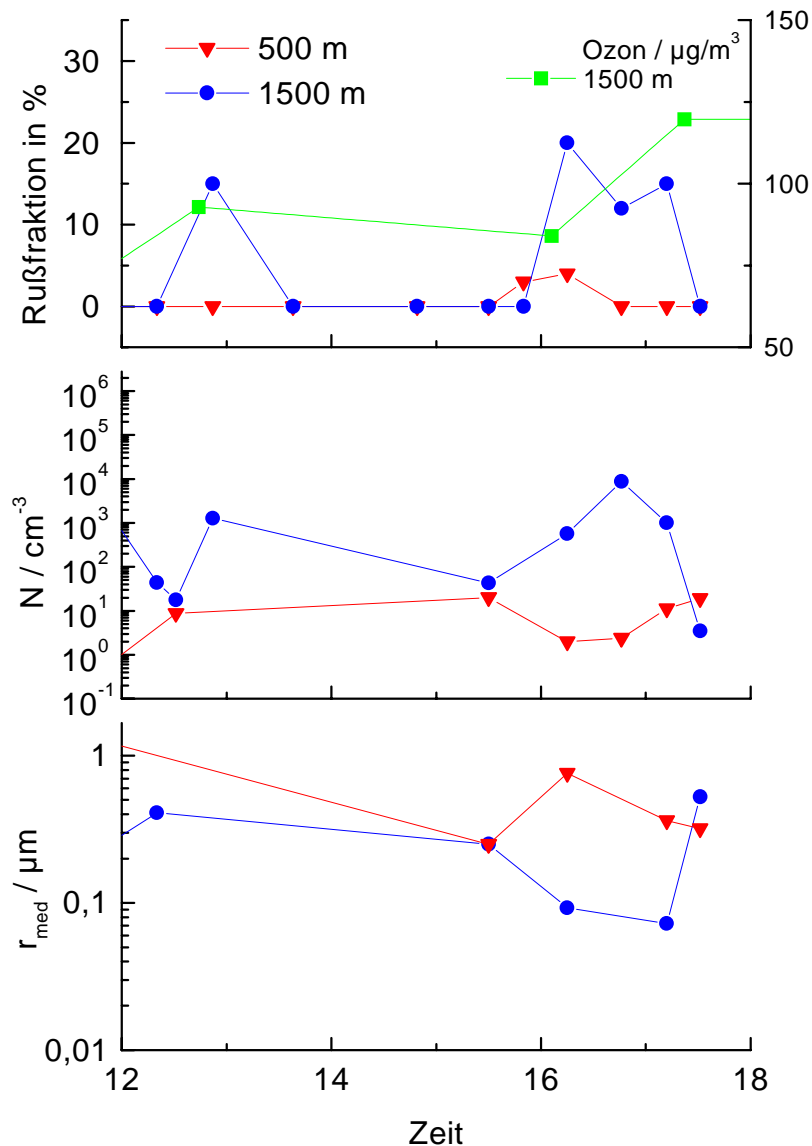


Abbildung 7.20 Resultate der ASD-Auswertung für den 6.8.98

7.3.1 Grenzschicht und Ozon

Am Morgen ist die Aerosolbelastung in der Grenzschicht sehr gering und läßt sich deshalb in Abbildung 7.17 nicht ausmachen. Dagegen erkennt man das Aufsteigen der Mischungsschicht, das an diesem Tag stets von Wolkenbildung an ihrer Obergrenze begleitet wird. Schon gegen 9:00 UTC ist die 1500 m mächtige PBL vollständig durchmischt. Die Höhe der Grenzschicht bleibt dann den ganzen Tag über stabil bei nur leichter Anhebung auf ca. 1700 m, was man auch den meteorologischen Daten entnehmen kann, die eine insgesamt stabil geschichtete Troposphäre ausweisen (Abbildung 7.18).

Innerhalb der Mischungsschicht entwickelt sich nur mäßig Ozon, was vor allem mit der durch die Wolken verminderten Sonneneinstrahlung zu tun hat. Die Werte erreichen am

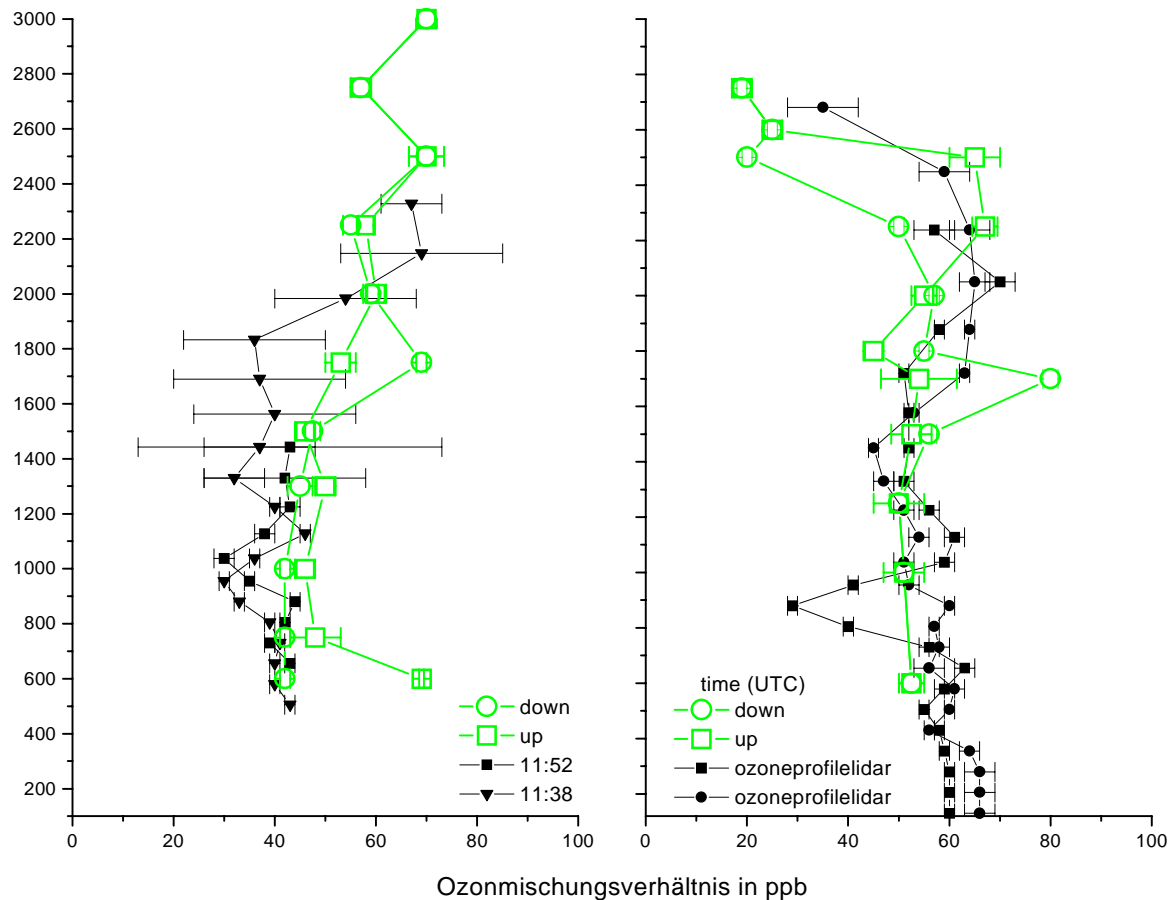


Abbildung 7.21 Vergleich der Ozonkonzentrationen, die mit dem Lidar gemessen wurden (je zwei ausgewertete Vertikal-Scans, schwarz), mit den Werten der Flugzeugmessung (grau). Eingetragen ist hier in jeder Höhe der Wert beim Aufsteigen (*) und beim Sinkflug (+), der Fehlerbalken gibt die Schwankungsbreite der Meßwerte im jeweiligen Höhenbereich an.

Nachmittag knapp $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Bemerkenswert dagegen ist die hohe Ozonkonzentration oberhalb der PBL, die schon am frühen Morgen erkennbar ist und am Tage Werte bis $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in einer Höhe von 2500 m erreicht (Abbildung 7.19). Es gibt aber aufgrund der Aerosoldaten keinerlei Hinweise auf einen Austausch von Luft der Grenzschicht mit dieser oberen Schicht, so daß hier nicht von Smogbildung aufgrund urbaner Emissionen geredet werden kann. Es scheint sich hier vielmehr um einen rein advektiven Vorgang zu handeln, durch den ozonreiche Luft herangetragen wird. Bemerkenswert ist, daß diese Luftmasse keine nennenswerte Menge an Aerosol mit sich führt, so daß auszuschließen ist, daß es sich hier um eine Abluftfahne einer außerhalb Berlins gelegenen Emissionsquelle handelt.

Die ozonreiche Luft wird gegen Abend von einer ozonarmen Luftmasse verdrängt. Diese Reinluft führt eine, wenn auch geringe Menge an Aerosol mit sich (Abbildung 7.17) und weist eine hohe relative Feuchte auf (Abbildung 7.18). In die Darstellung der Ozondaten (Abbildung 7.19) wurde die untere Grenze dieser Reinluftmasse eingezeichnet. Dies zeigt sehr deutlich, wie diese Luftmasse die ozonreiche Luft verdrängt. Was man hier offensichtlich sieht, ist die Auflaufschicht einer heranrückenden Warmfront.

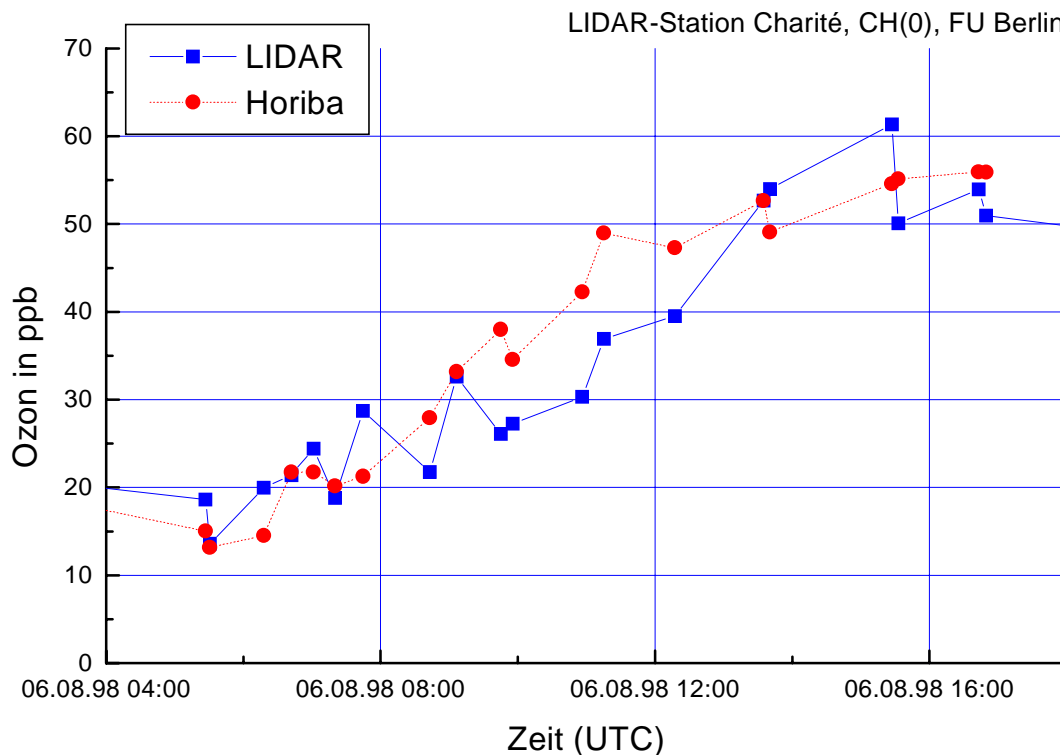


Abbildung 7.22 Vergleich von Lidar-Ozonmessungen mit den Werten des auf der Charité kontinuierlich messenden Ozonmonitors ("Horiba"). Dazu wurden Mittelwerte über horizontale Ozonprofile gebildet. Beide Messungen erfolgen so in der selben Höhe.

7.3.2 Aerosol-Größenverteilung

Da an diesem Tag die Aerosolmessungen fast immer von Wolken gestört wurden, ist eine ASD-Auswertung für diesen Tag schwierig. Es ergibt sich aber insgesamt das Bild, daß an diesem Tag das Aerosol ruralen Typs vorherrscht und sich nur wenig Einflüsse von urbanen Emissionen bemerkbar machen. Offensichtlich wird die Stadt an diesem Tag von einer Reinluftmasse durchströmt. Dies könnte ein weiterer Grund dafür sein, daß sich kein nennenswerter Ozonsmog an diesem Tag in der Grenzschicht bildet. Lediglich ab 16:00, also zur Stoßzeit, zeigt sich ein eindeutig urbaner Charakter der Partikel. Bemerkenswert ist, daß sich dabei in Bodennähe eine große Partikelmode in den Vordergrund schiebt. Dies kann mit einer Aufwirbelung von Staub zu tun haben.

7.3.3 Die Vergleichsmessung

Der erste Überflug fand mittags etwa um 12:00 UTC statt. Zu diesem Zeitpunkt war der Himmel bedeckt. Die Wolken behinderten die Lidarmessung oberhalb von 1400 m, was sich durch einen großen Meßfehler bemerkbar macht (Abbildung 7.21, links). Ozon wurde im Scan-Betrieb gemessen, so daß auch Daten unterhalb der Wolke zur Verfügung stehen. Beim zweiten Überflug um ca. 15:00 UTC herrschten wolkenfreie Bedingungen.

Insgesamt ist für beide Vergleiche eine recht gute Übereinstimmung der Datensätze festzustellen. Innerhalb der Fehlerbereiche wurden meistens die selben Werte gemessen. Die

Qualitätssicherung, die lediglich eine Übereinstimmung von 20% fordert, hat aus diesem Grund die Daten auch akzeptiert und das Qualitätssiegel verliehen.

Auffällig sind allerdings einige "Ausreißer" in den Lidardaten innerhalb der Mischungsschicht zu sehr kleinen Konzentrationen, die mit dem Meßgerät im Flugzeug nicht gesehen wurden. Die Ursache hierfür konnte nicht genau geklärt werden. Der Effekt der Aerosole auf die DIAL-Messung kann mit Hilfe des DIAL-Klett-Verfahrens weitgehend ausgeschaltet werden, so daß dies nicht in Frage kommt. Ein Effekt dieser Größenordnung wäre von den Aerosolen ohnehin nicht zu erwarten. Es ist hingegen durchaus denkbar, daß die Ozonkonzentration in der Mischungsschicht tatsächlich solchen Schwankungen ausgesetzt ist. Auch die Flugzeugmessung weist hohe Fluktuationen in der Konzentration auf. So wird bei dem Anflug in niedriger Höhe eine sehr hohe Ozonkonzentration von 70 ppb gemessen, die am Ende des Spiralfuges in der selben Höhe nicht mehr vorkommt.

Eine Erklärung hierfür könnte ein turbulentes Regime sein, in dem vertikale Austauschprozesse auf Skalen von mehreren hundert Metern ablaufen. Anschaulich kann man sich am Boden aufgewärmte Luftblasen dieser Größenordnung vorstellen, die aufsteigen, während andernorts kältere Luftpakete absinken. Es ist aufgrund der unterschiedlichen Herkunft solcher Luftpakete plausibel, daß diese sich in ihrer Schadstoffzusammensetzung und damit auch im Ozongehalt erheblich unterscheiden, so daß die im Prinzip durchmischte Grenzschicht durchaus Inhomogenitäten aufweisen kann.

Auffällig bei den Lidarmessungen im Scan-Betrieb ist, daß die in horizontaler Richtung gemessenen Signale häufig die größten Schwankungen im Ozongehalt aufweisen (Abbildung 7.23). Offensichtlich scheinen solche Turbulenzstrukturen insbesondere in einigen hundert Metern über dem Erdboden eine Rolle zu spielen. Die Ozonprofile in der oberen Grenzschicht sind solchen Schwankungen weniger ausgeprägt ausgesetzt. Messungen der Depolarisation, die im nächsten Kapitel gezeigt werden, bestätigen, daß die Mischungsschicht insbesondere in den untersten 500 m nicht als homogen angenommen werden kann.

Der Mittelwert über ein solches Horizontalprofil stimmt mit dem kontinuierlich arbeitenden Ozonmonitor (Horiba), der auf der Charité installiert ist, gut überein. Dieses Gerät hat eine längere Trägheitszeit und kann deshalb solche Schwankungen nicht auflösen (Abbildung 7.22).

Es ist von daher anzunehmen, daß die gemessenen Abweichungen in der Mischungsschicht den realen Gegebenheiten entsprechen und keinen Meßfehler darstellen. In Abbildung 7.21 (links) ist das Aufsteigen eines ozonarmen Luftpaketes zu beobachten. Wegen der räumlich und zeitlich hohen Variabilität solcher Ereignisse können sie von anderen Meßinstrumenten, die nicht exakt zu gleichen Zeit am gleichen Ort messen, wie z.B. das QS-Meßflugzeug, unter Umständen übersehen werden.

Es ist allerdings anzumerken, daß diese Inhomogenitäten wegen ihrer hohen zeitlichen Variabilität einen systematischen Fehler auf den Messungen verursachen könnten. Es ist davon auszugehen, daß nicht nur der Ozongehalt, sondern auch der Aerosolgehalt, schnellen zeitlichen Veränderungen unterworfen ist. Wenn sich dadurch die optischen Eigenschaften der Atmosphäre innerhalb der Meßzeit von ca. 200 s deutlich verändern, kann dies einen Fehler auf den berechneten Ozongehalt in schwer vorhersagbarer Weise haben.

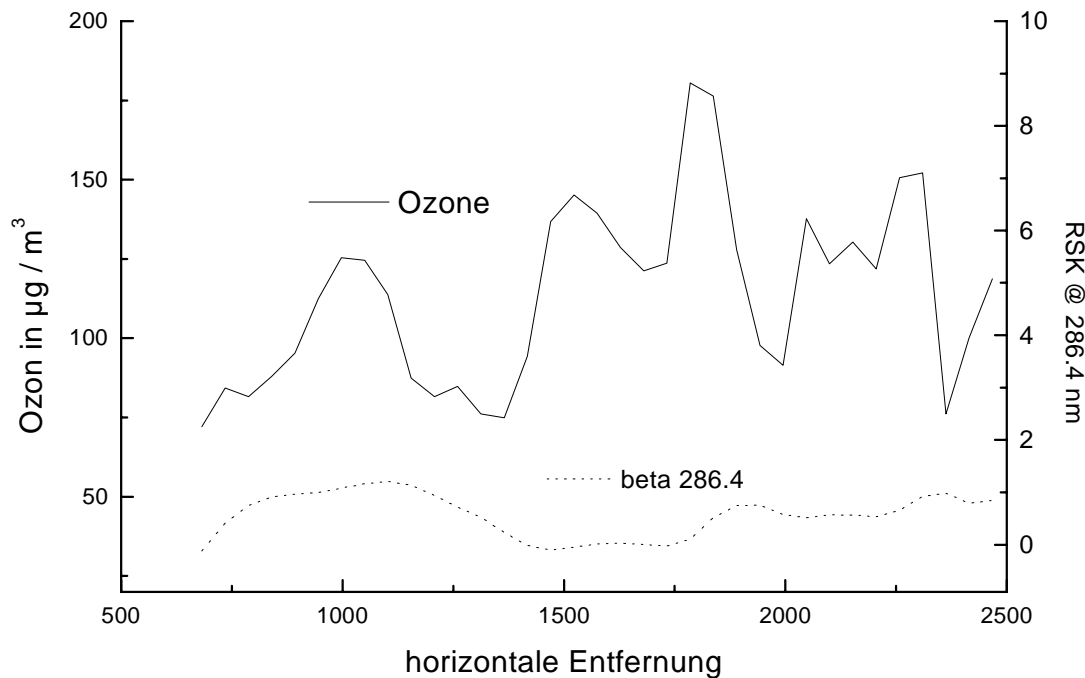


Abbildung 7.23 Horizontalprofil von Ozon und Aerosolrückstreuung bei 286.4 nm vom 6.8.98, 15:30 UTC, beide Profile weisen erhebliche Schwankungen auf. Die Meßdauer für so ein Profil beträgt 200 s.

Es wäre in jedem Falle interessant, dieses Phänomen genauer zu untersuchen. Dazu wäre es wünschenswert auch mit dem TAD Horizontalmessungen durchführen zu können, um so Aerosol-Horizontalprofile mit kurzer Meßdauer zu untersuchen. Dies war mit dem bestehenden Aufbau nicht möglich, so daß wir uns hier damit begnügen müssen, mit der Mittelwertbildung einen relativ guten Wert für die Ozonkonzentration in niedrige Höhe zu finden (Abbildung 7.22).

7.4 Wolken

Wegen ihres großen Einflusses auf die solare Strahlung, und damit auf einen Schlüsselparameter im Zusammenhang mit photochemischer Smogbildung, sind Auftreten, Häufigkeit und Höhe, sowie optische Eigenschaften von Wolken von großem Interesse. Das Lidar stellt im Prinzip ein geeignetes Instrument dar, um diese Größen zu messen.

Eine quantitative Auswertung von Lidardaten mit Wolken ist aber aus einer Reihe von Gründen sehr schwierig, die genaue Bestimmung optischer Eigenschaften mit dem hier verwendeten Instrument nur in geringem Umfang möglich. Dies liegt zum einen daran, daß dichte Wolken für die Laserstrahlen undurchdringlich sind und damit das Klett-Verfahren zur Auswertung der Signale nicht angewendet werden kann. Weitere Probleme sind die in Betracht zu ziehende Mehrfachstreuung, sowie die hohe Variabilität von Wolken.

Dennoch können mit Hilfe des Lidar einige wichtige Meßdaten von Wolken gewonnen werden. Das Gerät reagiert sehr sensitiv auf das Auftreten von Wolken, auch die mit dem Auge nicht sichtbaren dünnen Zirruswolken in der oberen Troposphäre ("subvisible cir-

rus") können leicht mit dem Lidar detektiert werden, sofern nicht tiefer liegende Wolken die Sicht behindern. Die Wolkenunterkante kann präzise festgestellt werden. Bei Wolken, die noch ausreichend transparent sind, kann auch die Wolkendicke bestimmt werden. In letzterem Falle ist auch eine Abschätzung der Gesamtextinktion der Wolke möglich.

Für BERLIOZ ist im Zusammenhang mit Berechnungen der Strahlungsintensität die Frage interessant, wann welcher Wolkentyp aufgetreten ist. Die wichtigste Klassifizierung von Wolken bezieht sich auf die Höhe, in der sie auftreten. In der Grenzschicht hat man es meist mit Kumuluswolken zu tun, in der mittleren Troposphäre sind Altostratus und Alto-kumulus der vorherrschende Typus, während in der oberen Troposphäre Zirruswolken auftreten.

Die Lidardaten der BERLIOZ-Kampagne wurden daher entsprechend ausgewertet und eine Datenbank erstellt, die die Meßzeit und Dauer, sowie die Höhe von detektierten Wolken enthält. Das Ergebnis ist für die wichtigsten BERLIOZ-Meßtage in Abbildung 7.24 dargestellt, wobei hier eine schwarze Markierung anzeigt, daß in dem angegebenen Höhenbereich eine Wolke festgestellt wurde. Man erkennt darin, daß z.B. am 6.8. der Himmel den ganzen Tag über bedeckt war. Die Wolken in der Grenzschicht haben wir in Abschnitt 7.3.1 schon bemerkt. Am Nachmittag lösten sich diese Wolken auf, dafür zeigten sich dann in der oberen Troposphäre Zirruswolken.

Insgesamt konnte mit den Lidarmessungen der Station Charité ein wertvoller Beitrag zur BERLIOZ-Meßkampagne geleistet werden. Dies betrifft neben den Ozonmessungen auch die Aerosoldaten, mit deren Hilfe die Struktur der Grenzschicht und dynamische Prozesse beleuchtet werden. Daneben sind die gewonnenen Daten über die optischen Eigenschaften und die Größenverteilungen des Aerosols, sowie die Wolkenstatistik auch für die Evaluierung der Strahlung von Relevanz, einem weiteren Schlüsselparameter bei der Betrachtung photochemischer Prozesse der Troposphäre.

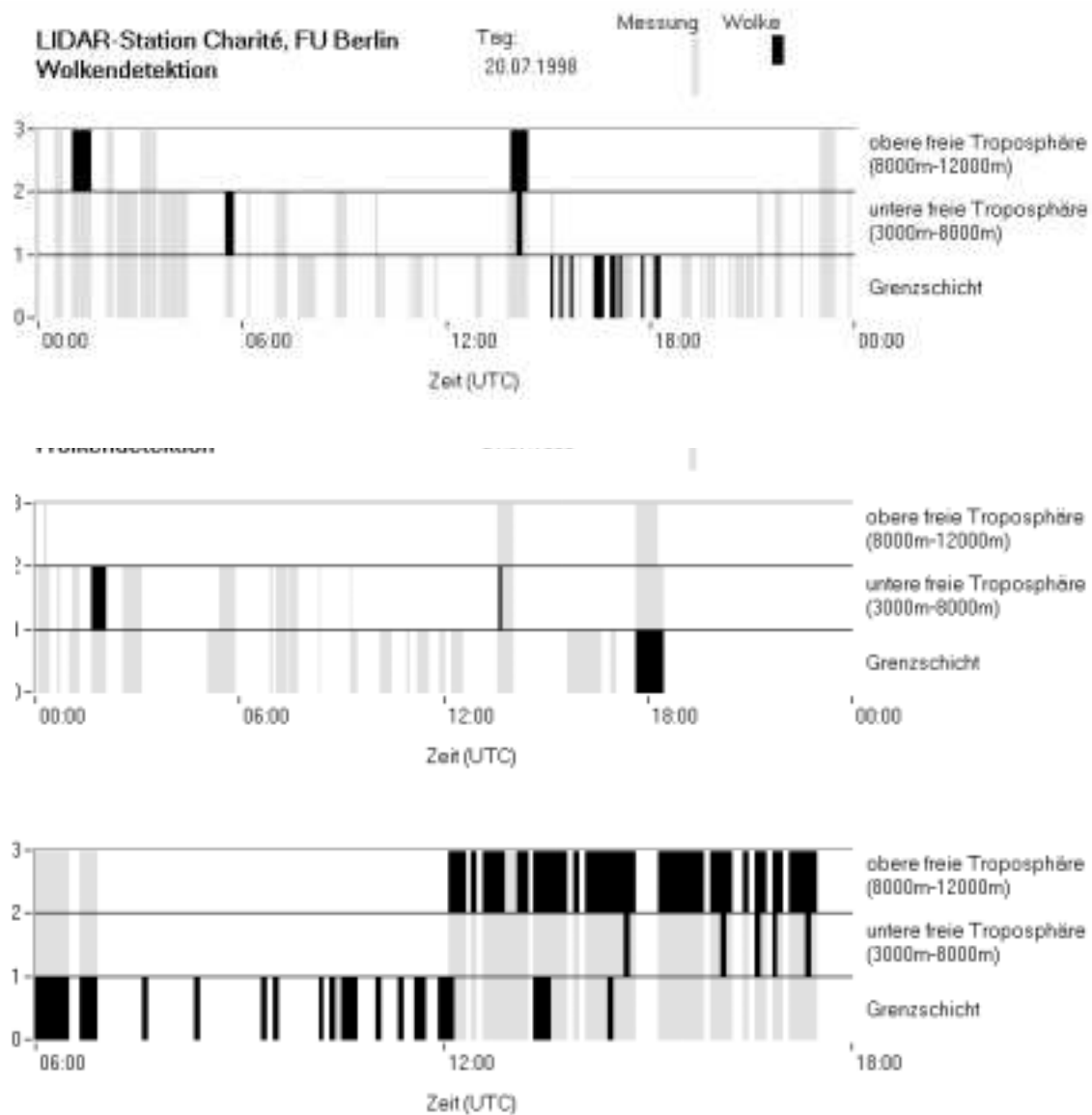


Abbildung 7.24 Wolkenstatistik für die wichtigsten Meßtage der BERLIOZ-Kampagne. Zeitpunkt und Höhenregion der Wolke sind schwarz markiert. In den weißen Bereichen liegen keine Daten vor.