

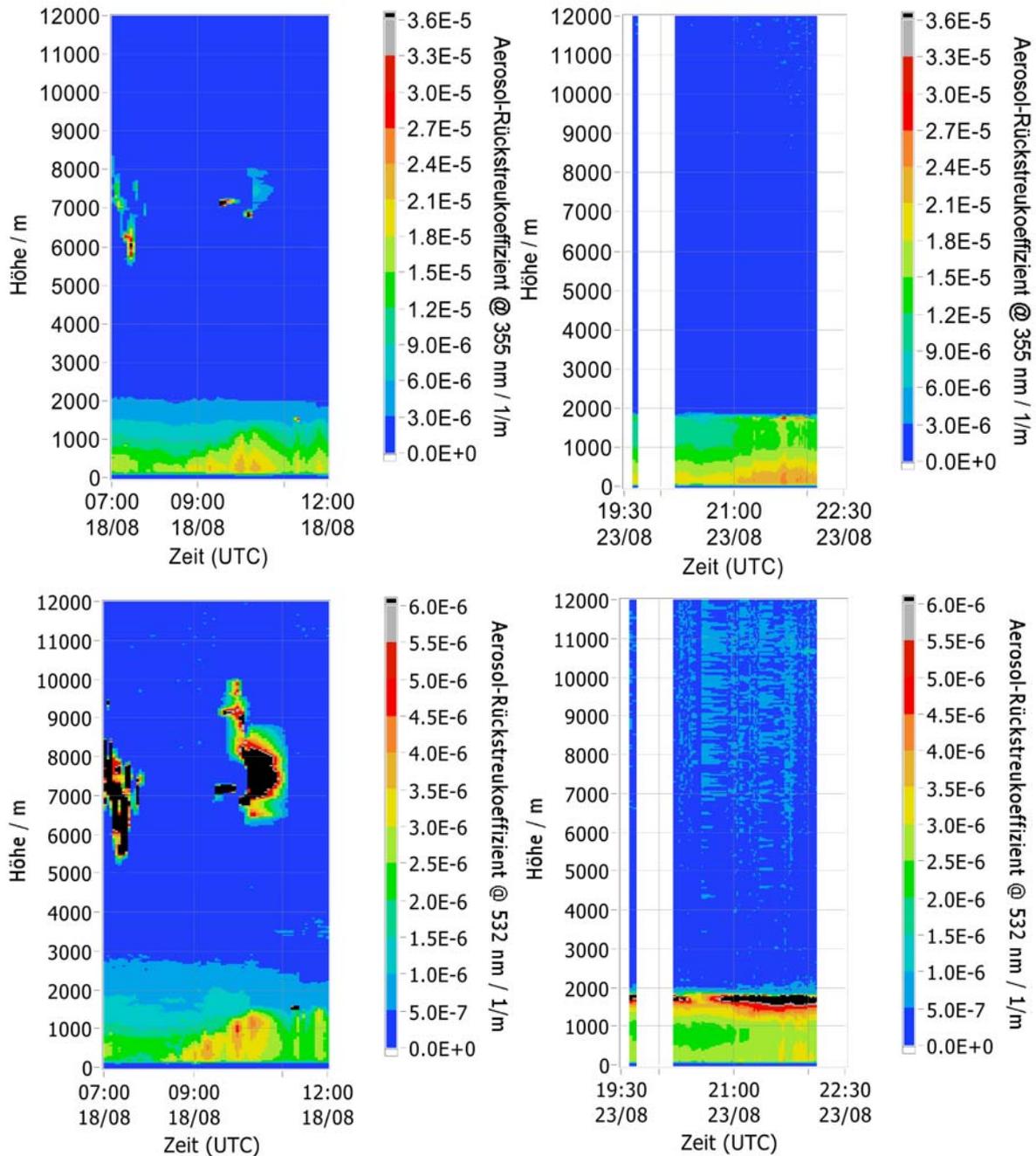
# 4 Die planetare Grenzschicht aus der Sicht des Lidar

In diesem Kapitel werden ausgewählte Messergebnisse präsentiert, die mit den vorgestellten Methoden und Instrumenten gewonnen wurden. Sie demonstrieren, wie die planetare Grenzschicht mit einem Laser-Fernerkundungsgerät untersucht werden kann. Bei der Auswahl wurde der Schwerpunkt auf Ergebnisse gelegt, für die Vergleichsmessungen oder Modellrechnungen vorliegen. Diese sind besonders interessant, da sie der Weiterentwicklung der Messmethode dienen. Zeitreihen wie Tages-, Wochen-, und Jahresgänge interessieren im Zusammenhang mit Ergebnissen von Simulationen. Im Verlauf meiner Tätigkeit haben wir gemeinsam mit anderen Forschergruppen am BERLIOZ-Experiment, das der Erforschung der Oxidantienbildung in der Berliner Stadtluft galt, und der OLAK-Kampagne, die Fragen zur Genauigkeit der Laser-Fernerkundungsmessungen von Ozon-Konzentrationen beantworten sollte, teilgenommen. Für den Zeitraum beider Experimente liegen zahlreiche Vergleichsmessungen und Ergebnisse des chemischen Ausbreitungsmodells CALGRID vor. Darüber hinaus werden erste Resultate des neu entwickelten Kilohertz-Lidar vorgestellt. Die Darstellung wird, entsprechend dem methodischen Ansatz der Arbeit, anhand der Messgrößen strukturiert, die Chronologie ist dabei untergeordnet.

## 4.1 Aerosol

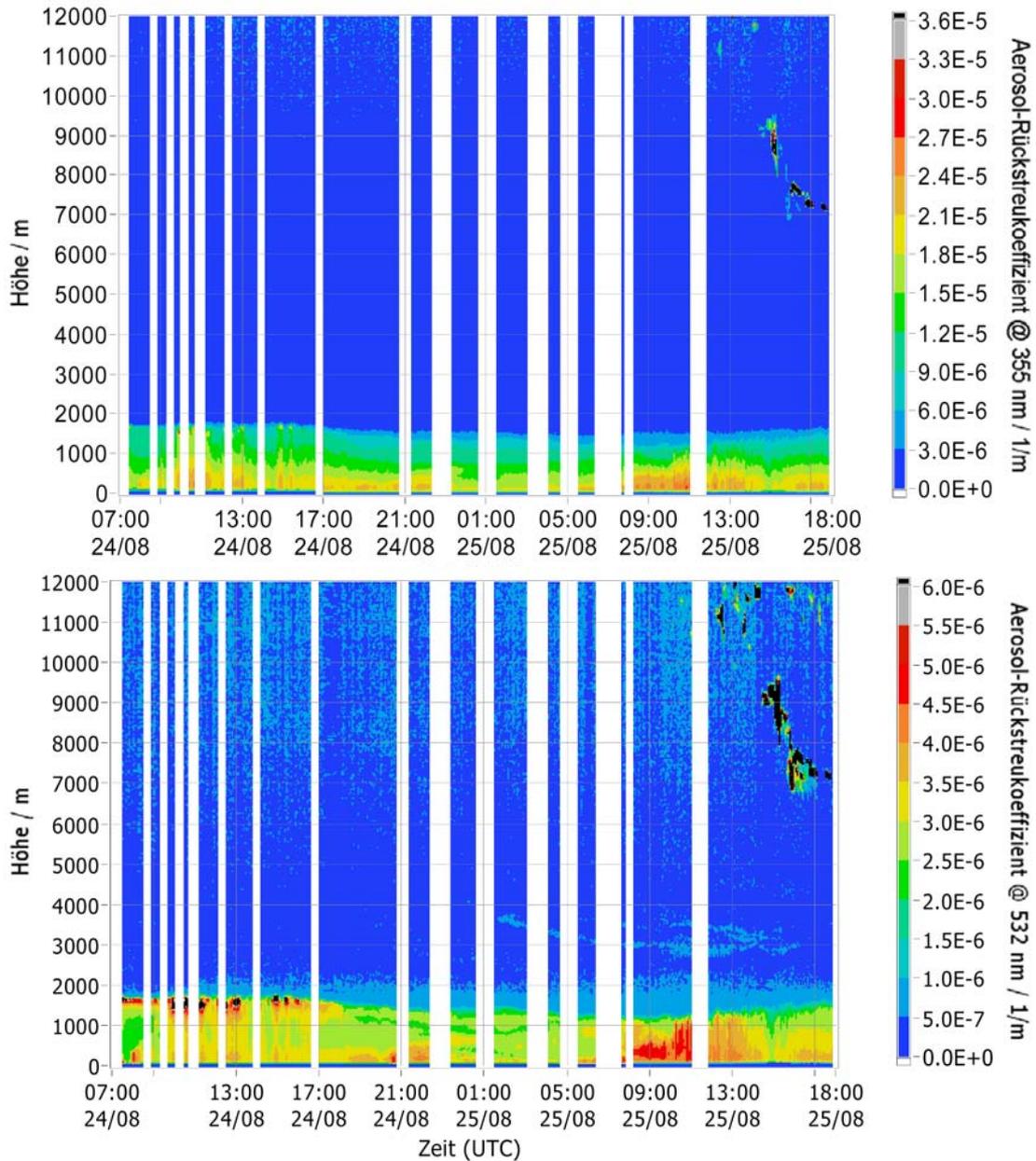
Die Untersuchung des atmosphärischen Aerosols ist die populärste Anwendung der Laser-Fernerkundung. Im Gegensatz zu anderen Bestandteilen der Atmosphäre ist das Aerosol sehr inhomogen verteilt und starken zeitlichen Veränderungen unterworfen, was in

den farbigen Darstellungen der Messreihen deutlich zu erkennen ist. Die Abbildungen 4-1 und 4-2 zeigen zusammenhängende Zeitreihen des Aerosol-Rückstreuungskoeffizienten. Die zeitliche Auflösung entspricht ca. 4 min und die Höhenauflösung 7,5 m.



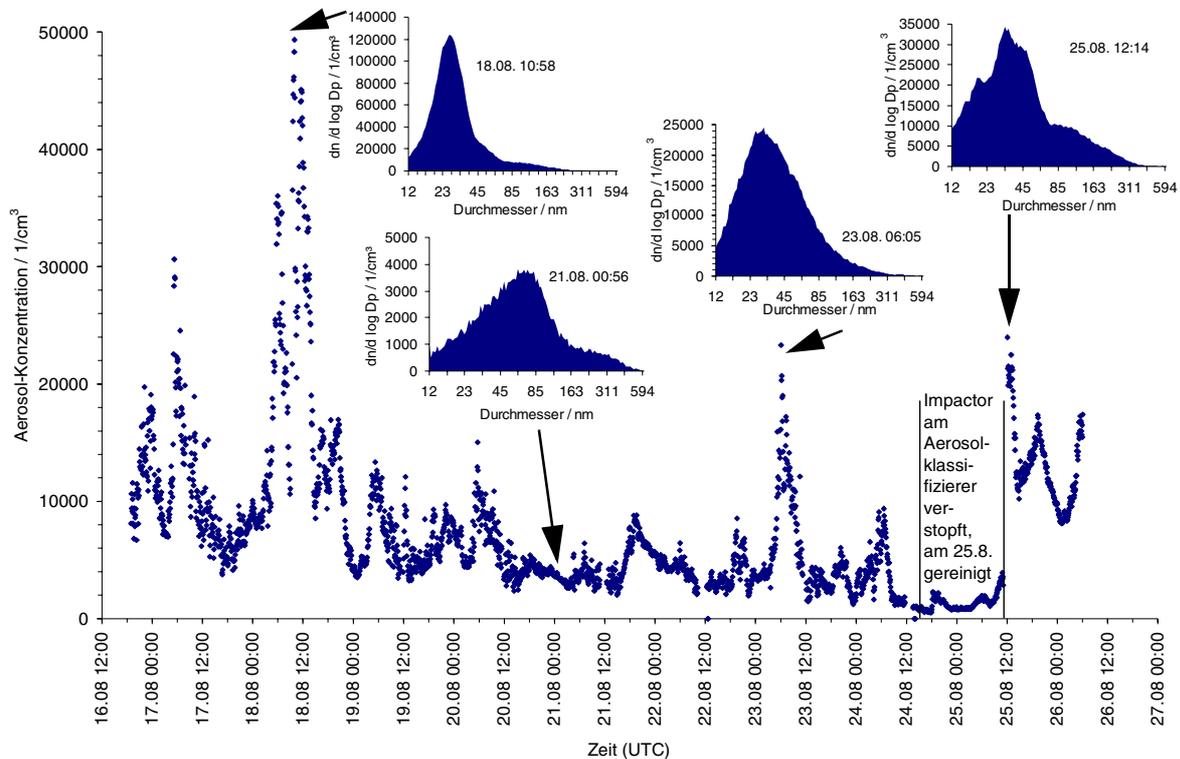
**Abb. 4-1** Aerosol-Rückstreuungskoeffizient bei 355 und 532 nm am Morgen des 18. 8. und Abend des 23. 8. 1999 über dem Berliner Stadtzentrum (Lidar-Messstation Charité).

Die im Folgenden vorgestellten Lidar-Daten wurden mit dem Aerosol-Lidar auf dem Dach des Charité-Hochhauses in Berlin Mitte aufgenommen. Zum Vergleich stehen Messungen des in § 3.4 beschriebenen Messflugzeugs, des Fesselballons, der Radiosondenstation des



**Abb. 4-2** Tagesgang des Aerosol-Rückstreuungskoeffizienten bei 355 und 532 nm am 24./25. 8. 1999 über dem Berliner Stadtzentrum (Lidar-Messstation Charité).

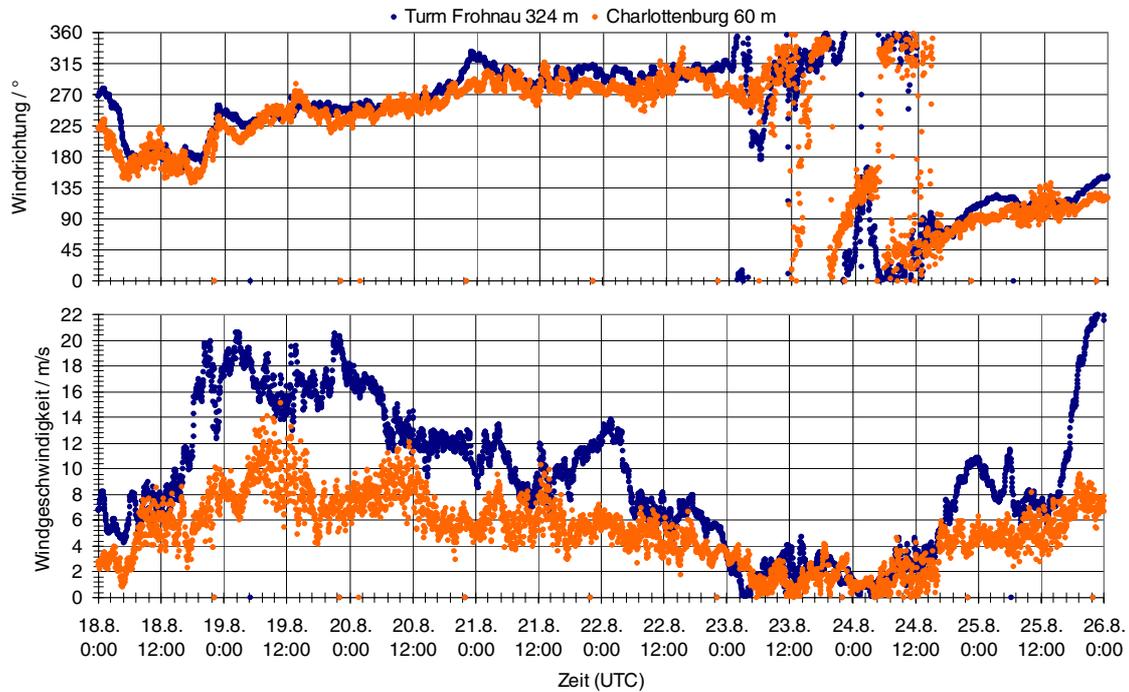
Deutschen Wetterdienstes in Lindenberg bei Berlin, des Berliner Luftgütemessnetzes und verschiedener In-Situ-Analysatoren der Charité-Station zur Verfügung. Der Anlass für die aufwendige 10-tägige Messreihe im August 1999 mit dem Kampagnennamen OLAK war, Laser-Fernerkundungssysteme zur Messung der Ozonkonzentration mit flugzeug- und ballongestützten In-Situ-Messungen zu vergleichen, und den Einfluss verschiedener Aerosol-Typen auf das Ozon-Messergebnis zu erforschen. In Abbildung 4-3 ist eine Messreihe der Aerosol-Größenverteilung dargestellt. Sie wurde mit einem Analysator mit 256 Größenklassen zwischen 12 und 600 nm auf dem Dach der Charité gemessen. Die angegebene Par-



**Abb. 4-3** Partikelkonzentration (Mittel über 4 min) für den gesamten Zeitraum und Aerosol-Größenverteilungen (12 bis 615 nm) für ausgewählte Zeitpunkte der OLAK-Vergleichskampagne [Spittler und Olatariu, 1999].

tikelkonzentration ist die über alle Kanäle des Analysators summierte Partikelzahl. Als Anhaltspunkt und Beispiel sind auch einige typische Spektren dargestellt. Bemerkenswert ist, dass die Konzentration im gesamten Zeitraum sehr niedrig ist. Spitzen mit gleichzeitigen Flugzeug- und Lidar-Messungen gibt es am 18., 23. und 25. 8. 1999. Kleine Partikel dominieren eindeutig die Größenverteilungsspektren. In den Lidar-Messungen vom Morgen des 18. 8. (Abbildung 4-1 links) ist deutlich erkennbar, wie zwischen 8:30 Uhr und 11:00 Uhr Aerosol aufsteigt. Das ist typisch für den Morgen eines Sommertags. Durch die Erwärmung des Bodens nach Sonnenaufgang entsteht Konvektion. Zusammen mit den Abgasen steigt Wasserdampf und Staub auf, was zur Aerosolbildung führt. Der hohe Wasserdampfgehalt der Luft erhöht außerdem den Wärmehalt der Luftpakete und ermöglicht so die Überwindung der in der Nacht entstandenen Temperaturinversionsbarrieren.

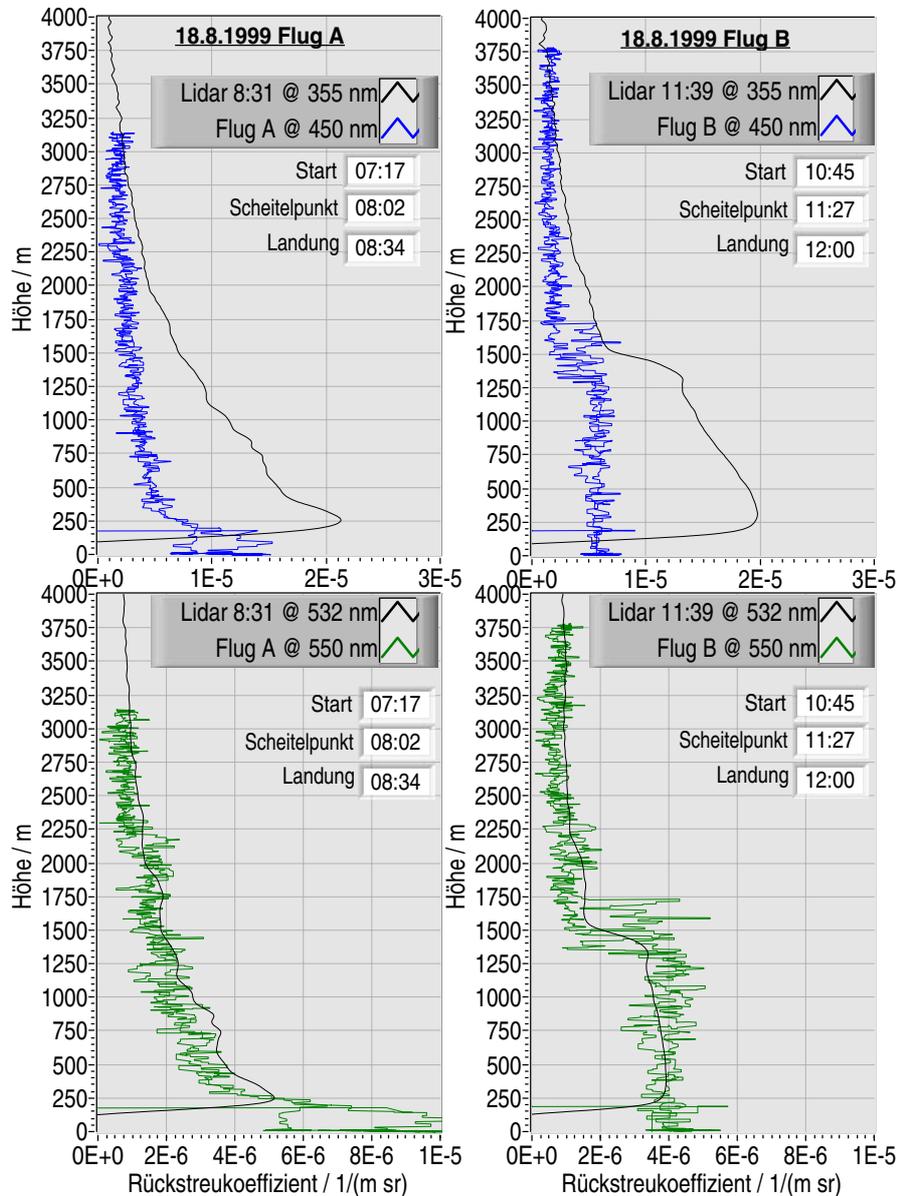
In den Abbildungen 4-1 und 4-2 sind zeitlich geschlossene Messreihen des Aerosol-Rückstreuoeffizienten bei 355 und 532 nm zu sehen. Aufnahmen dieser Art sind in Berlin wegen des unsteten Wetters nicht unproblematisch. Vertikale Rückstreusignale können nur ausgewertet werden, wenn auch Messwerte in der freien Troposphäre vorliegen, da erst dort das erforderliche Kalibrierintervall mit konstantem Aerosol-Rückstreuverhältnis zu finden



**Abb. 4-4** Windrichtung und -geschwindigkeit im Zeitraum der Vergleichskampagne, gemessen im Berliner Luftgüternetz BLUME an der Station Charlottenburg (blau) im Stadtzentrum, in einer Höhe von 60 m, und auf dem Funkturm in Frohnau (orange) im Norden Berlins, in einer Höhe von 324 m.

ist. Bei geschlossener Wolkendecke ist die quantitative Auswertung schwer bis unmöglich und bei wechselnder Bewölkung müssen Signale mit zu geringem Signal-zu-Rausch-Verhältnis in der freien Troposphäre aussortiert werden. Regionen, in denen das Wetter weniger durch den Einfluss periodischer Tiefdruckgebiete beeinflusst wird, sondern vielmehr jahreszeitlich stabil ist, sind für Untersuchungen von Prozessen im Zeitraum von Tagen besser geeignet und wegen der meist höheren Verschmutzung auch interessanter. Die Rückstreuwerte in Schichten mit kleinen Wolken sind unzuverlässig, da die Signale mit und ohne Wolken summiert im Rechner gespeichert und ausgewertet werden. Das neu entwickelte Lidar mit Einzelschussaufzeichnung bringt in diesem Fall eine große Verbesserung, da Wolken in den Einzelschüssen trotz der verrauschten Signale klar identifiziert und nicht mit addiert werden. Die Qualität der infraroten Signale war zu schlecht, um sie für quantitative Auswertungen nutzen zu können.

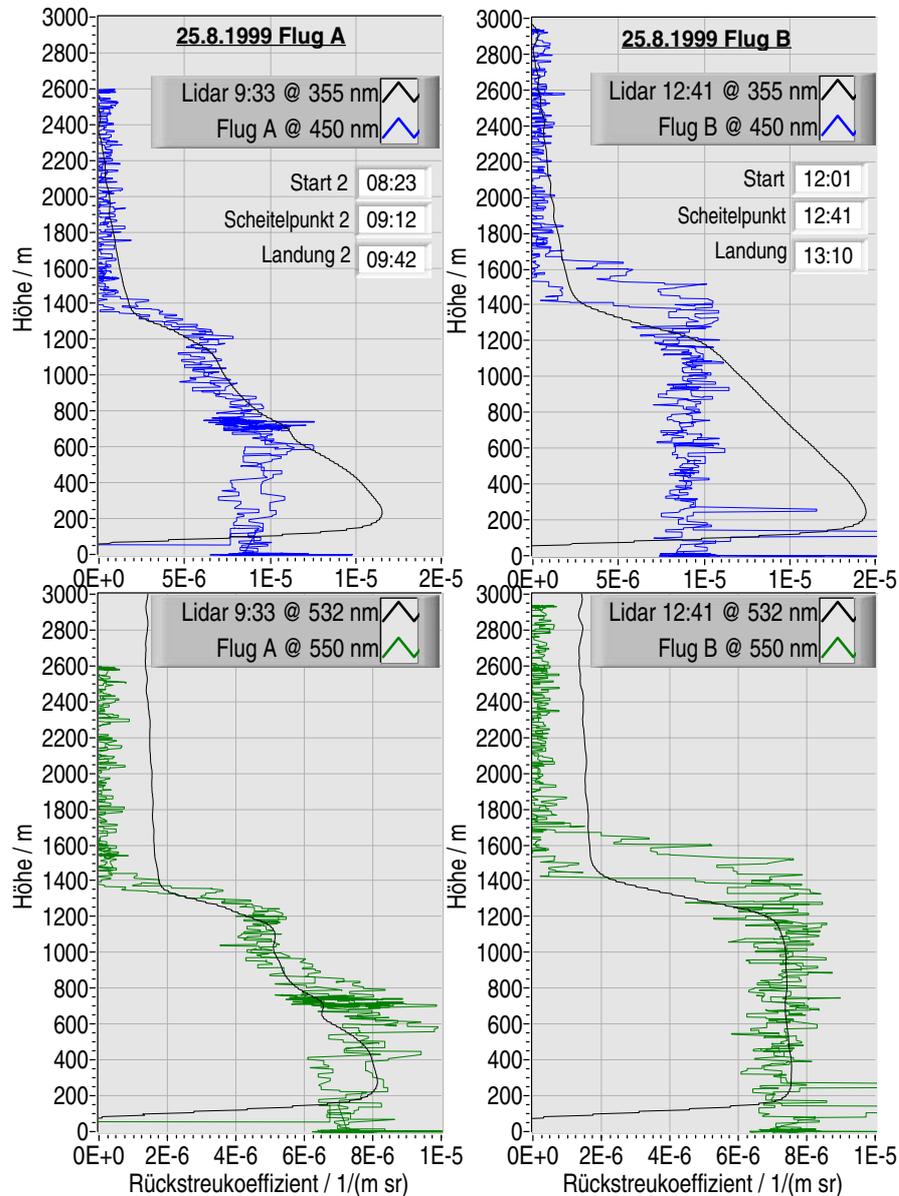
Für die Klimaforschung und die Suche nach den typischen Aerosolquellen in einer Region wird eine Datenbasis über mehrere Zyklen der Jahreszeiten benötigt. Langfristige Messreihen, d. h. über ein oder mehrere Jahre, wurden in Berlin noch nicht aufgenommen, sie sind jedoch seit Oktober 2001 in Arbeit. Sofern es das Wetter zulässt, wird an mehreren Tagen



**Abb. 4-5** Messungen des Aerosol-Rückstreukoeffizienten über der Messstation auf der Charité in Berlin Mitte mit zeitgleich aufgenommenen Flugzeug-Vergleichsmessungen am 18. 8. 1999.

in der Woche gemessen. Dazu werden Signale bei 355, 532 und 1064 nm, die Depolarisation und das Raman-verschobene Signal bei 387 nm aufgezeichnet.

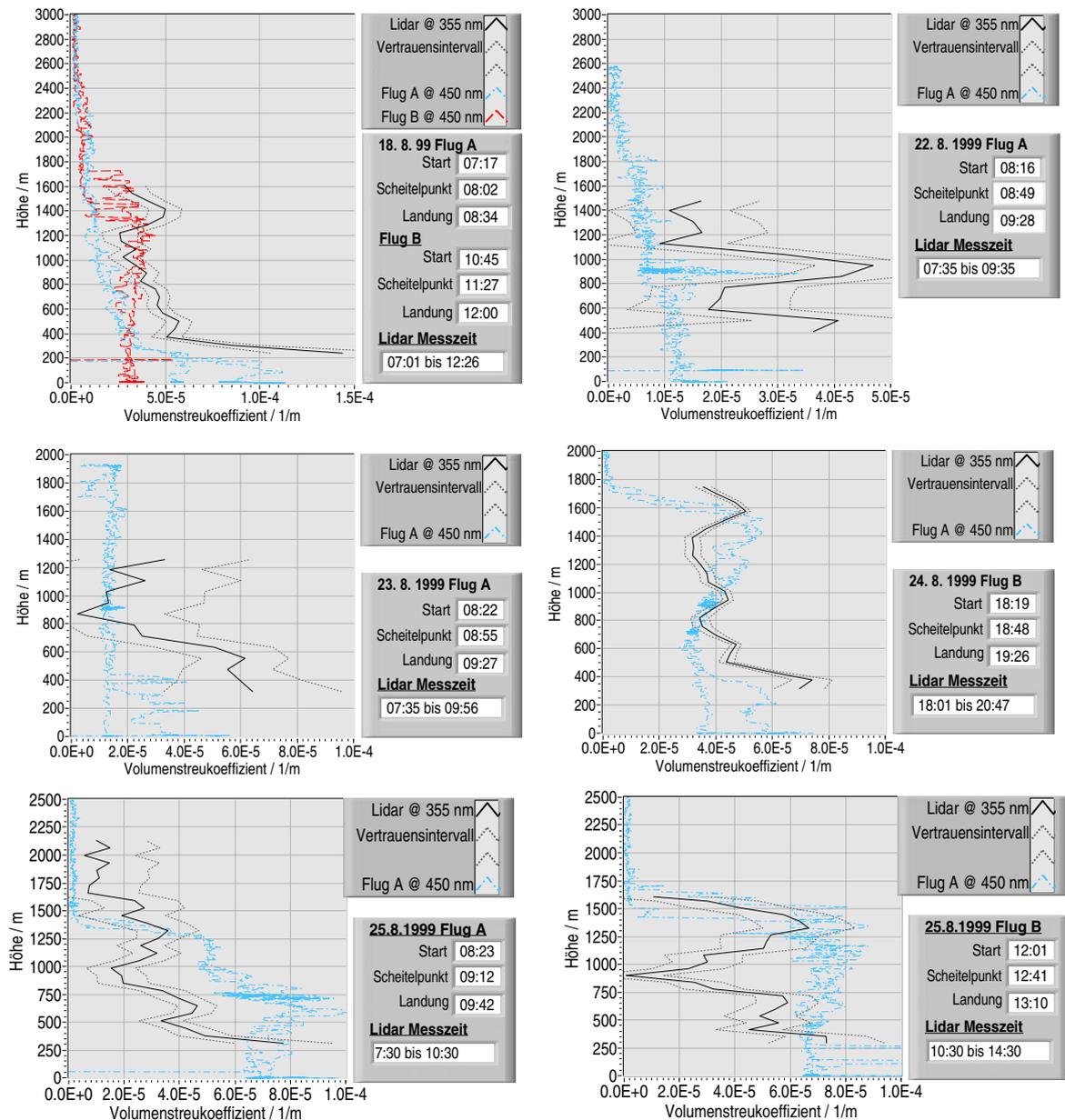
Die Daten der Vergleichskampagne bieten die sehr seltene Möglichkeit, die Laser-Fernkundungsergebnisse unabhängigen Messungen optischer und physikalischer Aerosol-Eigenschaften gegenüberzustellen. Wie bereits in § 2.2.3 erläutert, wird zur Berechnung des Aerosol-Rückstreuverhältnisses das Lidar-Verhältnis, ein Dichteprofil und das Rückstreuverhältnis in einem Kalibrationsintervall in der freien Troposphäre benötigt. Die Flugzeugmessungen bieten die Möglichkeit, üblicherweise verwendete Standardwerte bzw.



**Abb. 4-6** Messungen des Aerosol-Rückstreukoeffizienten über der Messstation Charité in Berlin Mitte mit zeitgleich aufgenommenen Flugzeugvergleichsmessungen am 25. 8. 1999.

Radiosondenprofile weiter entfernter Stationen mit den Werten direkt am Laserstrahl zu vergleichen. Die sich ergebenden Unterschiede führen für die Vergleichsmessungen zu keinen nennenswerten Unterschieden bei der Auswertung.

Mit dem Nephelometer im Flugzeug wurden Extinktions- und Rückstreukoeffizienten des Aerosols direkt neben dem Laserstrahl bestimmt. Zu beachten ist jedoch, dass weder der erfasste Winkelbereich noch die Wellenlängen die gleichen wie beim Lidar sind. Das Nephelometer erfasst gestreutes Licht aus einen Winkelbereich zwischen  $7$  und  $170^\circ$  für die Extinktions- und zwischen  $90$  und  $170^\circ$  für Rückstreumessungen. Ein Lidar empfängt



**Abb. 4-7** Vergleichsmessungen der Aerosol-Extinktion. Die Raman-Lidar-Messungen wurden bei einer Wellenlänge von 355 bzw. 387 nm und die Nephelometer-Messungen bei 450 nm durchgeführt.

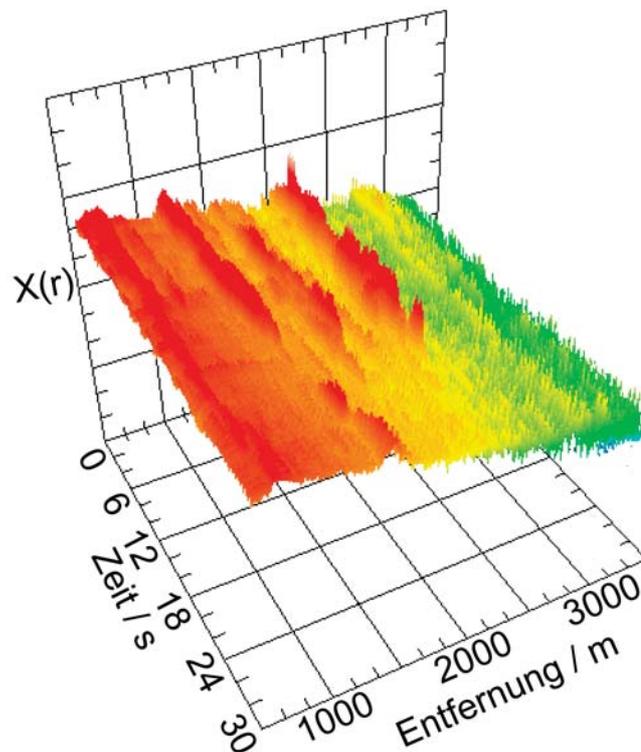
nur Licht aus dem sehr kleinen Streuwinkel von ca.  $0,06^\circ$  (1 mrad). Die Wellenlängen unterscheiden sich im ultravioletten Bereich um etwa 100 nm. Gerade dort ist die Unsicherheit wegen der unbekanntenen Wellenlängenabhängigkeit der Aerosol-Streuung am größten. Die kürzeste Wellenlänge des Nephelometers ist 450 nm. Das grüne Licht stimmt in der Farbe sehr gut mit dem Lidar überein. Weiterhin ist bei Messungen mit beweglichen In-Situ-Geräten in Flugzeugen und Ballons zu bedenken, dass es sich um Momentaufnahmen der Messgröße an jedem Punkt handelt. Lidar-Daten enthalten hingegen gleichzeitig Messwerte an vielen Punkten entlang des Laserstrahls für jeden Schuss. Abhängig von der

Auswertung und dem Signal-zu-Rausch-Verhältnis müssen jedoch Messpunkte der gleichen Entfernung mehrerer Schüsse addiert werden. Die Mittelungszeiten liegen bei Messungen des Rückstreukoeffizienten zwischen 30 s und 4 min und bei Extinktionsmessungen im Rahmen von Stunden. Angesichts dieser Einschränkungen der Vergleichbarkeit ist die gute Übereinstimmung der Messungen erstaunlich. Für die Berechnung der Rückstreukoeffizienten wurde ein konstanter Wert für das Lidar-Verhältnis im gesamten Höhenbereich angenommen. Bei der Simulation zur Bestimmung der nötigen Größen wurde das Aerosol der freien Troposphäre mit der Größenverteilung nach Jänicke [Jänicke, 1993] und dem Brechungsindex von Wasser verwendet. Die Dichteprofile entstammen den Radiosondaufstiegen der Station Lindenberg bei Berlin.

Die Rückstreukoeffizienten bei 532 nm stimmen in der Grenzschicht sehr genau mit den Vergleichsmessungen überein. Selbst kleinskalige Strukturen werden durch beide Messungen genauso wiedergegeben. Im Kalibrationsintervall in der freien Troposphäre fallen die Werte nur am 18. 8. 1999 (Abbildung 4-5) aufeinander. Am 25. 8. 1999 (Abbildung 4-6) hat das Nephelometer keine Aerosol-Streuung in der freien Troposphäre registriert. Wird dieses Resultat für die Kalibrierung bei der Lidar-Inversion verwendet, sind die Rückstreukoeffizienten in der Grenzschicht zu klein.

Trotz der Unterschiede bei den betrachteten Raumwinkeln wurden sehr ähnliche Ergebnisse gemessen. Das bestätigt die Mie-Simulationen, wonach der größte Teil des Lichts nach vorn und hinten gestreut wird. Die zusätzliche Messung von Licht aus anderen Winkelbereichen leistet nur einen unbedeutenden Beitrag.

Die Lidar-Extinktionsprofile bei 355 nm und die Nephelometermessungen haben die gleiche Höhenstruktur und sehr ähnliche Werte. Das Flugzeug hat beim Auf- und Abstieg in der Grenzschicht sehr unterschiedliche Werte gemessen, was auf eine hohe Variabilität hindeutet, die bei der Lidar-Messung nicht erfasst wird, da über längere Zeiten gemittelt werden muss. Anders als bei elastischen Rückstreumessungen führt das nicht zu Mittelungsfehlern, da das Aerosol keinen Einfluss auf die Rückstreuintensität hat, sondern nur auf die Messgröße, die Extinktion. Stickstoff-Raman-Aerosol-Extinktionsmessungen scheinen somit hervorragend geeignet zu sein, die Wirkung des Aerosols auf den Strahlungshaushalt zu untersuchen, da es dabei auf den Durchschnittswert der Streuparameter ankommt.



**Abb. 4-8** Aerosol-Rückstreumessungen mit einer Zeitauflösung von 100 ms auf dem kleinen Feldberg im Taunus. Auf dem Foto sind der grüne Laserstrahl des Lidar und der weisse Strahl des DOAS-Gerätes zu sehen, im Hintergrund der Große Feldberg.

Mit dem neu entwickelten Ozon-Raman-DIAL-Lidar wurden bisher vorwiegend Testmessungen zur Erprobung der Methode und der neu entwickelten optischen und elektronischen Komponenten durchgeführt. Abbildung 4-8 zeigt den Laserstrahl des Lidar bei einer Kam-

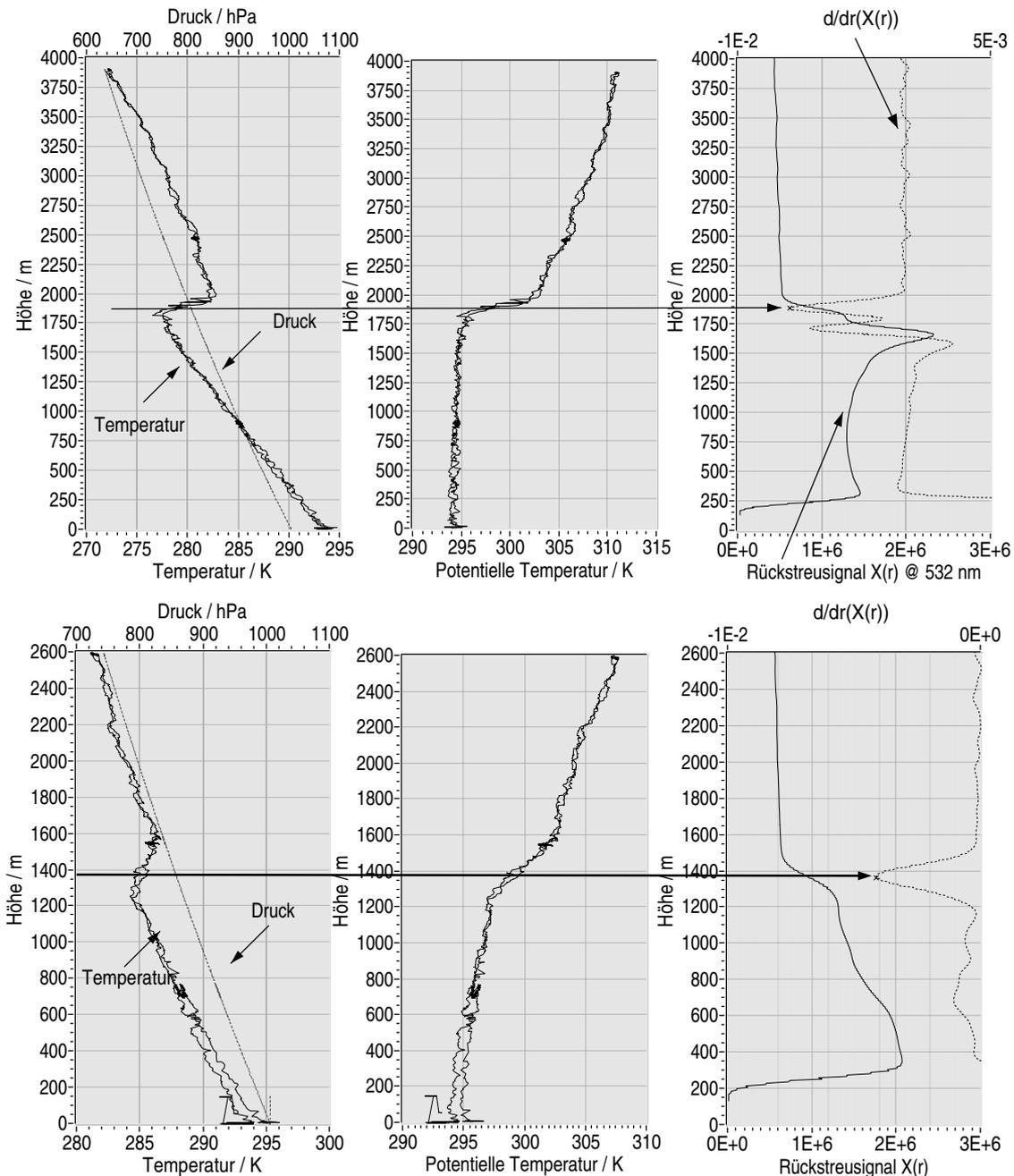
pagne im Oktober 2000 auf dem kleinen Feldberg im Taunus. Sie wurde nicht zu Unrecht „Härtetest“ genannt. Fast die gesamte Zeit über war die Bergspitze mit allen Gerätschaften in Nebel gehüllt oder es regnete. Die Grafik zeigt eine über 30 s aufgenommene Signalfolge horizontaler Messungen mit einer zeitlichen Auflösung von 100 ms, also 300 Entfernungsprofile. Selbst auf dieser kurzen Zeitskala sind starke Veränderungen der Streuintensität sichtbar. Die Zeitauflösung lässt sich mit der neu entwickelten Elektronik bis zur Wiederholrate des Lasers von 1 kHz steigern. In Abbildung 4-20 sind Aerosol-Extinktionsmessungen im UV-Bereich dargestellt, die mit dem neuen System aufgenommen wurden. Das ist natürlich nur möglich, weil gleichzeitig die Ozonkonzentration mit dem Raman-DIAL-Verfahren ermittelt wird. Die großen Fehlerbalken der Messungen erklären sich durch die schlechte Transmission der im Test verwendeten Detektionsoptik und der Signalaufnahme durch einen Transientenrecorder. Im fertigen System wird eine Photonenzählkarte eingesetzt.

Ein robustes Messsystem, wie es auf der Lidar-Station im Zentrum Berlins existiert, ist für Untersuchungen des Aerosols sehr gut geeignet. Da es über einen längeren Zeitraum gewachsen ist, sind einige Lösungen nicht ideal und nicht überall wird die optimale Technik verwendet. Insbesondere ist der Gesamtaufbau mechanisch nicht stabil genug, und die optische Kopplung des Teleskops mit der Detektoroptik durch eine Lichtleitfaser ist problematisch. Wie die Praxis und die ray-tracing-Simulationen zeigen, ist die Justage einer guten Abbildung des Signals über den gesamten Entfernungsbereich eine Kunst. Das gilt insbesondere für den Infrarot-Kanal, da die Detektorfläche zu klein ist. Für Tageslichtmessungen der Extinktion müsste der Filter etwas schmalbandiger sein. In dem neu entwickelten System wurde versucht, die bereits bekannten Probleme von vornherein auszuschließen. Insbesondere soll das durch einen kompakten Aufbau und eine direkte Ankopplung der Empfangsoptik an das Teleskop erreicht werden. Sehr wichtig ist die Möglichkeit, einzelne Signale mit der Wiederholrate des Lasers aufzuzeichnen, um Mittelungsproblemen vorzubeugen.

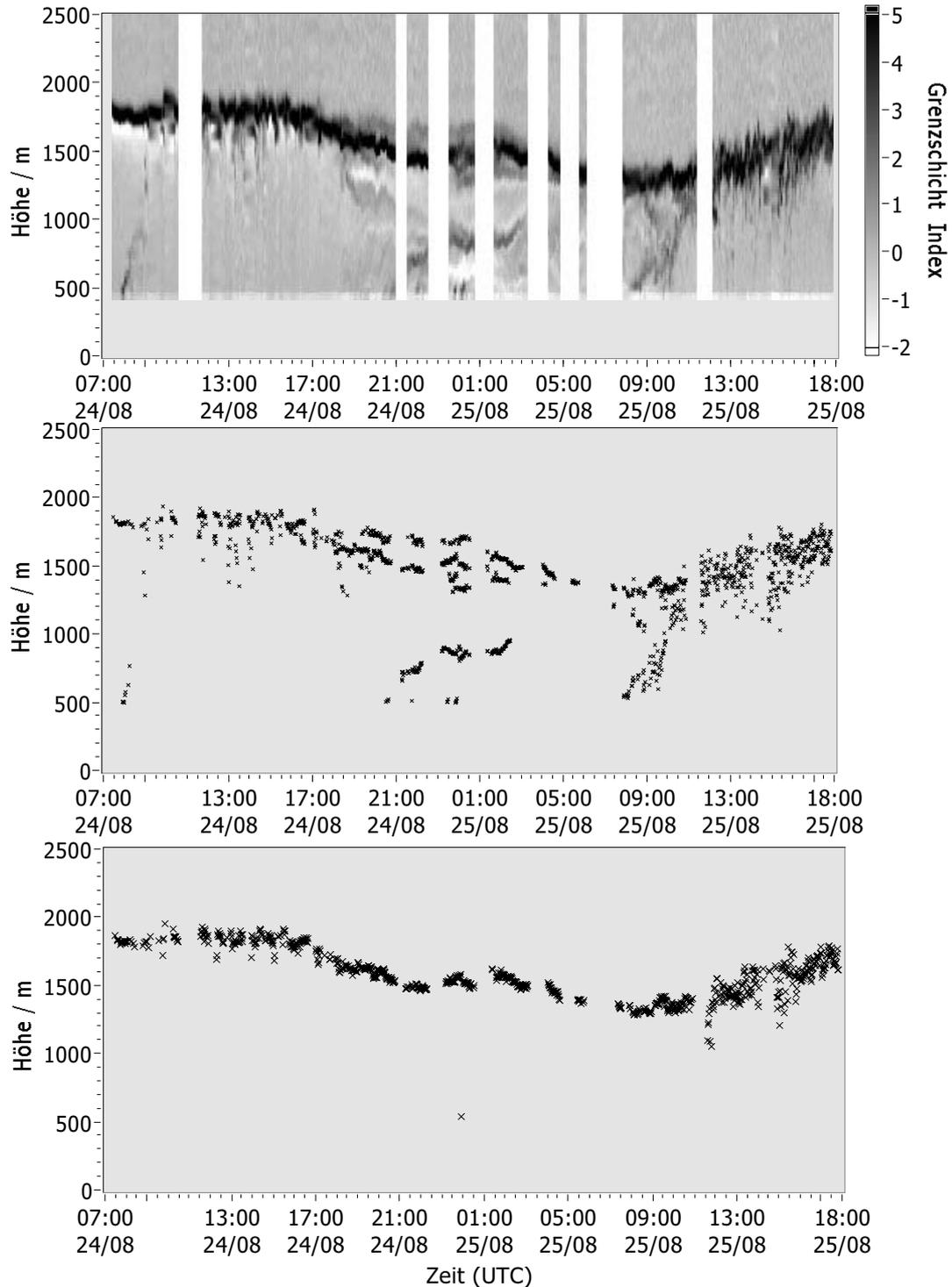
## 4.2 Mischungsschichthöhe

Betrachtet man vertikale Profile des Aerosol-Rückstreuoeffizienten, hebt sich die freie Troposphäre deutlich durch ihre Sauberkeit von der bodennahen Grenzschicht ab. Aerosol, das durch Aufwirbelung und chemische Reaktionen der vom Boden stammenden Stoffe

gebildet wird, gelangt nur sehr selten über die Barriere zur freien Troposphäre. Die verschieden stark streuenden Schichten machen aber deutlich, dass Luftbeimengungen innerhalb der Mischungsschicht nicht homogen verteilt sind. Farbliche Darstellungen der zeitlichen Entwicklung der Höhenprofile, wie sie in den Abbildungen 4-1 und 4-2 zu sehen sind, geben ein eindrucksvolles Zeugnis der komplizierten Struktur, aber noch keinen objektiven Anhaltspunkt, wo die Obergrenze der Mischungsschicht liegt.

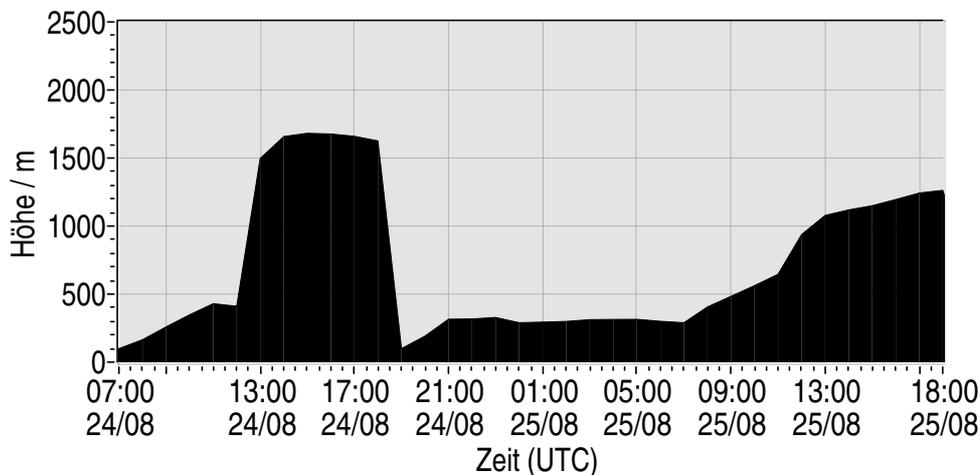


**Abb. 4-9** Bestimmung der Mischungsschichthöhe. Druck und Temperaturprofil wurden am 25. 8. 1999 zwischen 8:23 und 9:42 Uhr und am 4. 8. 1999 zwischen 9:48 und 11:28 Uhr während eines Vergleichsflugs der OLAK-Kampagne gemessen. Das Rückstreuprofil bei 532 nm wurde um 9:13 Uhr bzw. 11 Uhr, jeweils zur Scheitelzeit des Fluges, aufgenommen.



**Abb. 4-10** Aus der Aerosolrückstreuung abgeleitete Mischungsschichthöhe am 24./25. 8. 1999.

Eine Möglichkeit ist, nach dem stärksten Gradienten des linearisierten Rückstreusignals zu suchen. Im differenzierten Signal ist er durch das globale Minimum einfach numerisch zu erkennen. Abbildung 4-9 zeigt Beispiele für Lidar-Messungen, für die auch unabhängige Vergleichdaten vorliegen. Im ersten Fall tritt das Maximum deutlich hervor und markiert



**Abb. 4-11** Dem Modell CALGRID zugrundeliegende Mischungsschichthöhe am 24./25. 8. 1999.

die Mischungsschichthöhe bei 1400 m. Zwischen 600 und 800 m befindet sich noch ein schwächerer Gradient, der auf eine weitere Schichtung hindeutet. Wenn nur nach dem Hauptminimum gesucht wird, kann es passieren, dass die momentane Barriere für die Schadstoffausbreitung übersehen wird. Die Gefahr ist besonders groß, wenn noch verschmutzte Restschichten vorhanden sind, an denen der Rückstreukoeffizient stärker abfällt als an der untersten Schicht. Das ist typischerweise nachts der Fall. Deshalb müssen alle Minima bestimmt werden, wenn die Höhe der untersten Schicht gesucht wird.

Eine stark rückstreuende Schicht und Wolken ergeben ein Maximum mit einem darauf folgenden Minimum im differenzierten Signal. Während der in Abbildung 4-9 oben dargestellten Messungen herrschte lockere Bewölkung direkt an der Obergrenze der Mischungsschicht. Die Wolken sind an einem Maximum und dem darauf folgenden Minimum gut zu erkennen. Dann kommt in diesem Fall ein Sattelpunkt und danach der stärkste Gradient, welcher genau die Obergrenze der Grenzschicht bei etwa 1850 m markiert.

Für Berlin hat sich die relativ einfache Gradientenmethode bewährt. In komplizierterem Terrain kommt es häufiger vor, dass sich Schichten verschiedener Herkunft mischen, so dass die Anzahl der Minima unübersichtlich werden kann. In so einem Fall ist die Analyse des Signals durch eine Wavelet-Transformation zu bevorzugen.

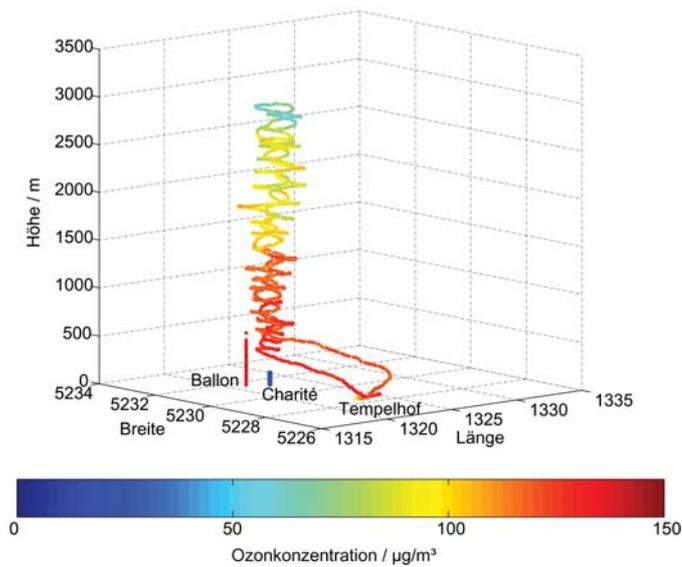
In Abbildung 4-10 ist eine beispielhafte Messreihe über zwei Tage mit einer ganzen Nacht dargestellt. Für den Zeitraum liegen Vergleichsmessungen (Abbildung 4-9) und Modellvorhersagen (Abbildung 4-11) vor. Der Unterschied zwischen der gut durchmischten Grenzschicht am Tage und der komplizierten Schichtstruktur in der Nacht tritt in der oberen

Abbildung deutlich hervor. Man kann nun alle Minima, die einen bestimmten Grenzwert unterschreiten, oder das Hauptminimum suchen. Das Ergebnis der ersten Methode ist in der mittleren Abbildung (4-10) zu sehen. Sowohl die nächtliche Bodeninversion als auch die Residualschicht sind gut erkennbar. In der unteren Abbildung ist für jedes Signal nur die Höhe des Hauptminimums der Ableitung aufgetragen. Aus Sicht des Lidar reicht die Grenzschicht bis zur Linie dieser globalen Minima. Erwartungsgemäß liegt sie nachts tiefer als am Tag. Der Mischungsraum wird allerdings nachts durch die Bodeninversion beschränkt, deren Verlauf in der Abbildung 4-10 (Mitte) für beide Nächte zu erkennen ist. Diese Darstellung enthält alle Minima der abgeleiteten Signale. Die Boden-Aerosolschicht löst sich in der Nacht vom 24./25. 8. 1999 gegen 3 Uhr morgens auf. Nach Sonnenaufgang sieht man eine neu gebildete Aerosolschicht aufsteigen. Gegen 10 Uhr verschmilzt sie mit der Residualschicht vom Vortag.

Die ermittelten Grenzschichthöhen stimmen sehr gut mit den Vergleichsmessungen überein. Aerosol markiert die gleiche Höhe wie die potentielle Temperatur. Das Modell sagt nur einen sehr vereinfachten Verlauf voraus. Die Zeitpunkte der Veränderungen stimmen gut mit der Realität überein. Die Absoluthöhen, die Auflösung der nächtlichen Bodeninversion und die Mischung mit der Residualschicht werden nicht reproduziert.

### 4.3 Spurengase

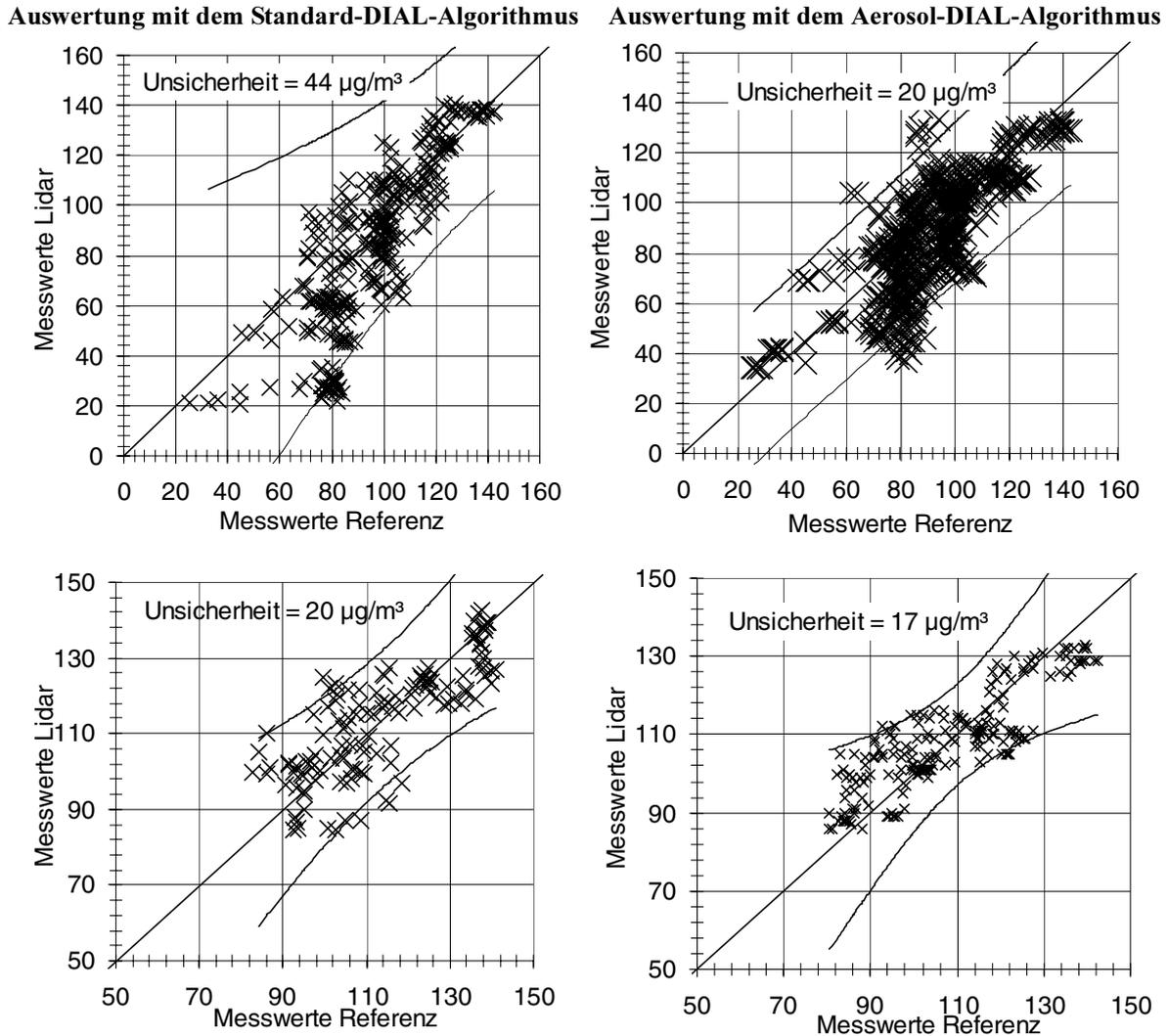
Messwerte der dreidimensionalen Verteilung der Konzentration von Spurengasen sind von einer Vielzahl von Anwendern gefragt. Besonders die Modellierung der Ausbreitung und Chemie von Luftverunreinigungen und des Klimas erfordern eine der Gitterweite der Modelle entsprechende räumliche und zeitliche Abdeckung mit Messwerten. Ebenso interessant sind die Fernmessungen für die Überwachung des Schadstoffausstoßes von Industrie und Verkehr. Ein einzelnes Laser-Fernerkundungs-Messgerät liefert eine Vielzahl von Konzentrationsmesswerten entlang des Strahls. Die gewonnenen Messwerte sind natürlich schwer mit anderen zu vergleichen. Nur flugzeug- oder ballongetragene Messgeräte können annähernd Aufschluss über die Genauigkeit bzw. Vergleichbarkeit der Methode liefern. Die Anwender der Daten verlangen jedoch zu Recht hohe Qualitätssicherungsstandards, da auch von anderen Methoden bekannt ist, dass zwei Messgeräte an der gleichen Stelle selten das Gleiche messen.



**Abb. 4-12** Vergleichsmessungen der Ozonkonzentration mit Fesselballon und Flugzeug im Zentrum Berlins

Im Zusammenhang mit dem Berliner Ozon-Experiment BERLIOZ wurde im Zentrum Berlins im Sommer des Folgejahres (1999) eine Vergleichskampagne durchgeführt. Teilgenommen haben außer dem Lidar auf der Charité noch drei weitere, sehr ähnlich aufgebaute, jedoch mobile Instrumente, ein mit Messinstrumenten bestückter Fesselballon und ein Messflugzeug [Weitkamp et al., 2001]. Abbildung 4-12 illustriert die räumliche Anordnung während der Vergleiche. Das Flugzeug flog nach dem Start in Berlin-Tempelhof in einer Spirale um den Strahl des Lidar auf der Charité (dargestellt als blauer Turm). In der Farbe der Spirale ist die Ozonkonzentration codiert, wie sie vom Flugzeug gemessen wurde. In den unteren 600 bis 800 m wurde zusätzlich ein Fesselballon, etwa 1,8 km nordöstlich der Charité, eingesetzt. Seine Messdaten sind ebenfalls durch ein farblich codiertes Ozonprofil in Abbildung 4-12 dargestellt.

Das besondere Interesse lag natürlich auf der methodischen Schwäche des DIAL-Verfahrens, dem Effekt der Aerosol-Rückstreuung auf die gemessenen Ozonwerte. Mithilfe der bereits in § 4.1 vorgestellten Aerosol-Lidar-Messungen konnte außer der Standard-DIAL-Auswertung auch eine Auswertung mit dem Aerosol-DIAL-Verfahren durchgeführt werden. Eine Schwierigkeit besteht natürlich in der nötigen Extrapolation der optischen Aerosol-Parameter in den UV-Bereich. Der Erfolg der neuen Auswertungsmethode war sehr tagesabhängig, wobei die Übereinstimmung mit den Vergleichswerten nie schlechter als bei der Standard-DIAL-Methode ausgefallen ist. In Abbildung 4-13 ist die mit dem Verfahren nach DIN ISO 13752 [DIN, 1999] ermittelte Messunsicherheit für den



**Abb. 4-13** Messunsicherheit bei DIAL-Messungen der Ozonkonzentration mit dem Messinstrument auf dem Charité-Hochhaus, bestimmt durch Vergleiche mit einem Referenzverfahren. Die oberen Abbildungen zeigen das Ergebnis aller im Blindversuch abgegebenen Daten für 8 Vergleichsflüge. Unten sind die Werte für einen ausgewählten Tag, den 25. 8. 1999, abgebildet.

Vergleich mit den Flugzeug- und Ballon-Referenzmessungen dargestellt. Die Aerosol-DIAL-Methode der Auswertung verringert die Abweichungen von durchschnittlich 44 auf 20 µg/m<sup>3</sup>. Nicht an allen Tagen führte sie jedoch zu einer so drastischen Verbesserung, wie das Beispiel vom 25. 8. 1999 in Abbildung 4-13 unten zeigt. Die dargestellten Messunsicherheiten in Abbildung 4-13 sind direkt im Doppelblindversuch ermittelt worden. Das heisst, keiner Seite waren vor dem Vergleich durch eine unabhängige Person die anderen Daten bekannt. Die Ergebnisse sind im Abschlussbericht der OLAK-Vergleichskampagne [Weitkamp et al., 2001] und in der Diplomarbeit von F. Herb [Herb, 2000] dargestellt und erläutert.

Nachdem die Vergleichsprofile bekannt waren konnte nach schlecht gewählten Parametern des Datenauswertungsprogramms gesucht werden. Dabei kommt es natürlich darauf an, nur Werte zu verändern, die alle Messungen gleichermaßen verbessern. Die mit dem Lidar gemessenen Profile stimmen im Mittel sehr gut mit den Referenzdaten überein, zeigen aber zu viele kleinskalige Strukturen. Diese Strukturen verschwinden, wenn für die Ableitung des Signals eine längere Regressionsgerade verwendet oder nachträglich das laufende Mittel des Profils gebildet wird. Um keine weiteren Parameter zu beeinflussen wurde die zweite Variante gewählt. Das Optimum liegt bei einer Mittlung über 500 m, d. h. 10 Punkte, der in einem Originalabstand von 50 m liegenden Vergleichspunkte [Herb, 2000]. In den Abbildungen 4-14 und 4-15 sind auf diese Art erzeugte Vergleichsprofile beider Auswertungsmethoden und die Referenzwerte abgebildet. Die Messunsicherheit nach DIN verringert sich durch diese nachträgliche Manipulation auf ca.  $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Diese Erfahrung ist sehr wertvoll. Es ist ausgesprochen schwer zu entscheiden, wie weit die Messsignale geglättet werden dürfen, um keine real existierenden Strukturen zu verlieren aber auch keine virtuellen zu erzeugen. Auf der anderen Seite ist aber auch Vorsicht geboten, denn eine gute Vergleichbarkeit mit herkömmlichen Methoden muss nicht heißen, das die Werte besser der Realität entsprechen. In diesem Fall wurde aber bewusst auf eine neue Auswertung verzichtet, um Zweifel an der Authentizität und der Nachvollziehbarkeit auszuräumen.

Am 22. 8. war die Sichtweite sehr gut und es herrschte wechselnde Bewölkung. Die Standard-DIAL-Auswertung ergab eine Ozonschicht in 600 m Höhe mit Konzentrationen, die um  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  höher als die Referenzwerte liegen. Beachtenswert ist, dass die Referenzverfahren in eben dieser Höhe keine gute Übereinstimmung zeigten, weshalb der sonst angegebene  $2\text{-}\sigma$ -Bereich der auf Höhenintervalle von 50 m gemittelten Werte nicht angegeben ist. In diesem Fall ist eine Auswertung mit der Aerosol-DIAL-Methode sinnvoll. Durch die darin enthaltene Trennung der Rückstreu- und Ozonauswertung kommt der Rückstreufehler nicht zum Tragen. Die Streueigenschaften des Aerosols wurden mit den Parametern des urbanen Aerosols berechnet.

Am 23. 8. hat das Referenzverfahren einen starken Konzentrationsgradienten bei 500 m Höhe gemessen, der bei der Standard-DIAL-Auswertung nicht erkannt wurde, sehr gut dagegen mit der Aerosol-DIAL-Auswertung. Hier hat ein gleichzeitiger Wechsel der Aerosol-Streueigenschaften und der Ozonwerte zu falschen Ergebnissen geführt.

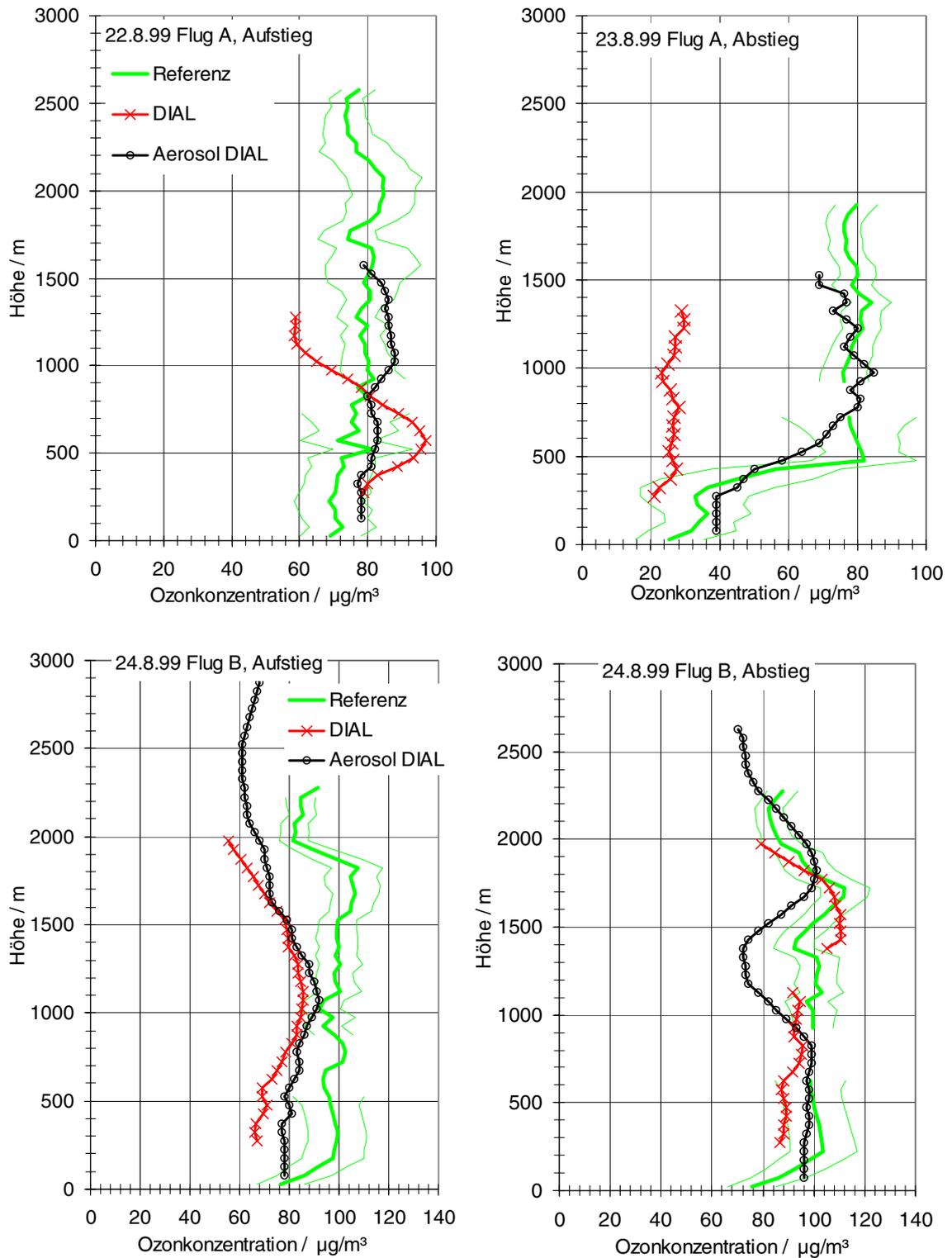


Abb. 4-14 Vergleichsmessung der Ozonkonzentration während der OLAK-Kampagne, 22./23./24. 8. 1999.

Am 24. 8. gab es viele kleine Wolken in einer Höhe von ca. 1400 m. Während des Aufstiegs des Flugzeugs wurden tendenziell niedrigere Werte durch das Lidar gemessen, die aber immer noch innerhalb des  $2\text{-}\sigma$ -Bereichs der über 50-m-Intervalle gemittelten Flug-

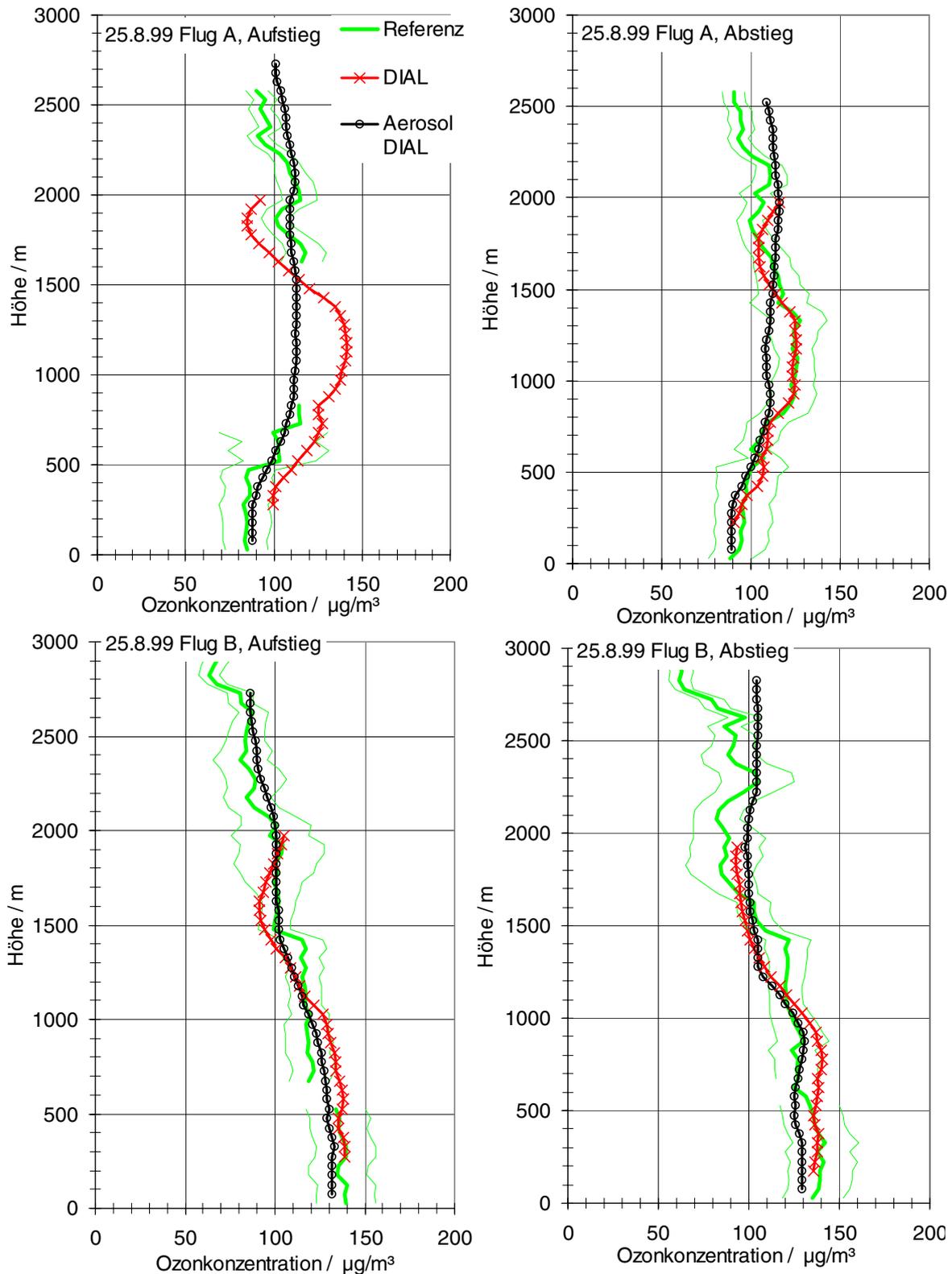
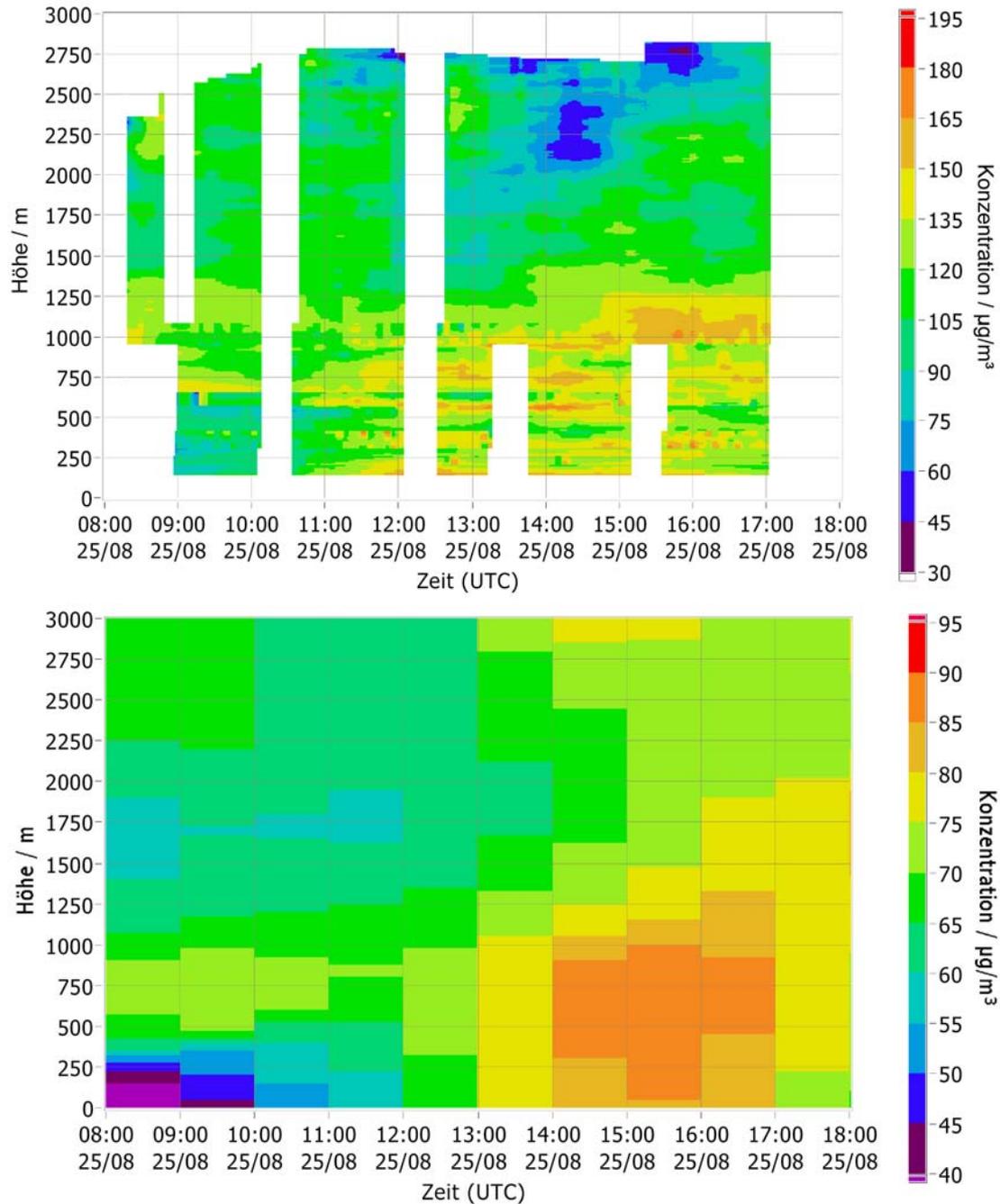


Abb. 4-15 Vergleichsmessung der Ozonkonzentration während der OLAK-Kampagne, 25. 8. 1999.

zeugmessungen liegen. Die während des Abstiegs gemessenen Signale konnten mit dem DIAL-Verfahren in der Höhe der Wolken gar nicht ausgewertet werden. Der Versuch, dies

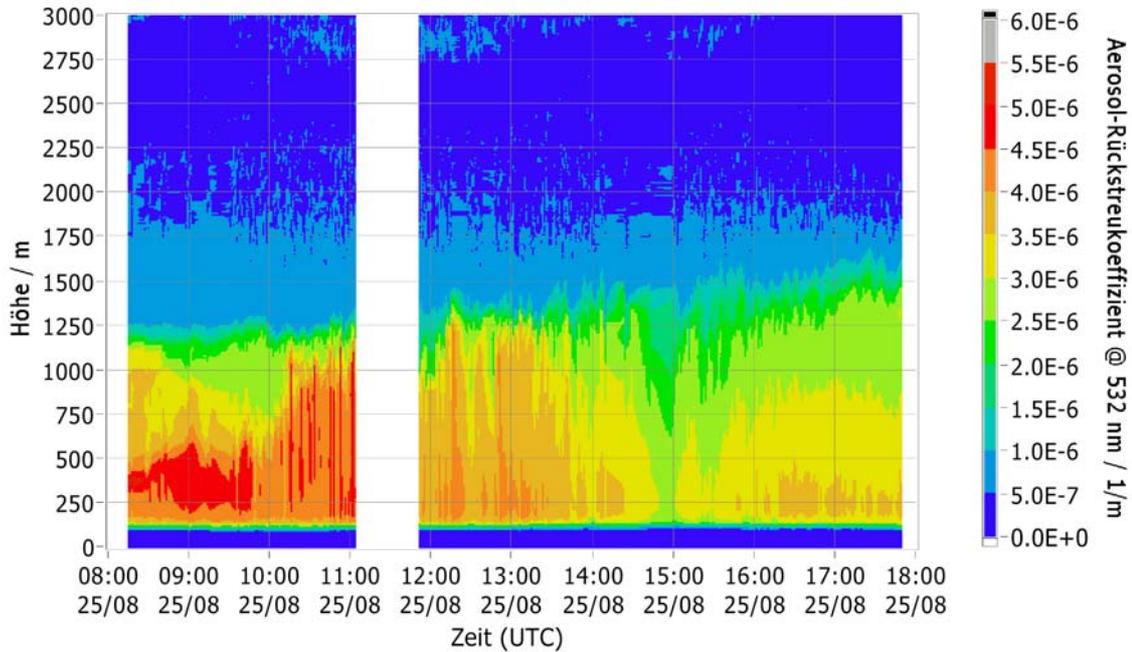
mit dem Aerosol-DIAL-Verfahren zu tun, schlug erwartungsgemäß ebenfalls fehl. Oberhalb und unterhalb der Wolkenschicht stimmen die Ozonwerte jedoch sehr gut mit der Referenz überein. An diesem Beispiel wird die meiner Meinung nach gefährlichste Fehlerquelle der DIAL-Ozonmessungen deutlich. Die Signale werden bereits direkt nach der Wandlung, noch vor der Übertragung in den Rechner, aufaddiert. Dabei können zwischen einem und 4096 Schüssen gesammelt werden. Während der Übertragung in den Rechner werden jedoch keine weiteren Signale aufgenommen. Bei zu kleinen Mittelungszahlen führt das im Fall des Lidar zu einem zu schlechten Verhältnis von Laserschüssen zu aufgezeichneten Signalen. Die Gefahr besteht darin, dass ein einzelner Schuss gegen eine Wolke das Ergebnis der Addition bereits so stark verfälscht, dass unsinnige Konzentrationswerte in dieser Höhe berechnet werden. Andererseits ist die Signalveränderung zu klein, um sie sicher numerisch erkennen zu können. Die einzige Lösung des Problems besteht in einer schnelleren Datenübertragung, die die Evaluierung einzelner bzw. weniger Signale vor der für die DIAL-Auswertung nötigen Mittlung erlaubt, ohne in der Zwischenzeit die Signalaufnahme unterbrechen zu müssen.

Der 25. 8. war ein Tag ohne Bewölkung, an dem beide Methoden der Signalauswertung ähnlich gute Ergebnisse brachten. Am Nachmittag zog von Westen eine Regenfront heran, die auch im Tagesgang der Rückstreuung gut zu erkennen ist. Besonders während des morgendlichen Aufstiegs (Flug A) entstand durch das typischerweise zu dieser Tageszeit im Sommer aufsteigende Aerosol ein Fehler bei der DIAL-Auswertung, der wiederum durch die Aerosol-DIAL-Methode umgangen werden konnte. Dieser Tag war der einzige mit nennenswerter Ozonbildung während der Vergleichskampagne. Daher habe ich ihn ausgewählt, um Vergleiche mit anderen Messreihen und Modellvorhersagen durchzuführen. Abbildung 4-16 zeigt die farbig dargestellten Zeitreihen der Ozonprofile über der Charité und die entsprechende Vorhersage des Modells. Es wird sofort deutlich, dass die gemessenen Werte in etwa um einen Faktor 2 höher liegen. Die am Nachmittag aufziehende Front drückte offensichtlich weniger ozonhaltige Luft nach unten. Dieser Effekt wird im Modellergebnis nicht wiedergegeben. Ansonsten stimmt die Struktur der Ozonkonzentration gut mit den Messwerten überein. In der auf denselben Höhen- und Zeitbereich vergrößerten Darstellung der Aerosol-Rückstreuoeffizienten ist zu sehen, wie sich die Front auf das Aerosol der Grenzschicht auswirkt. Die Rückstreuung nimmt gegen 14 Uhr drastisch ab, während der darauffolgenden Hauptverkehrszeit jedoch wieder zu.



**Abb. 4-16** Ozonmessung über der Charité und entsprechende Modell-Vorhersage, 25. 8. 1999.

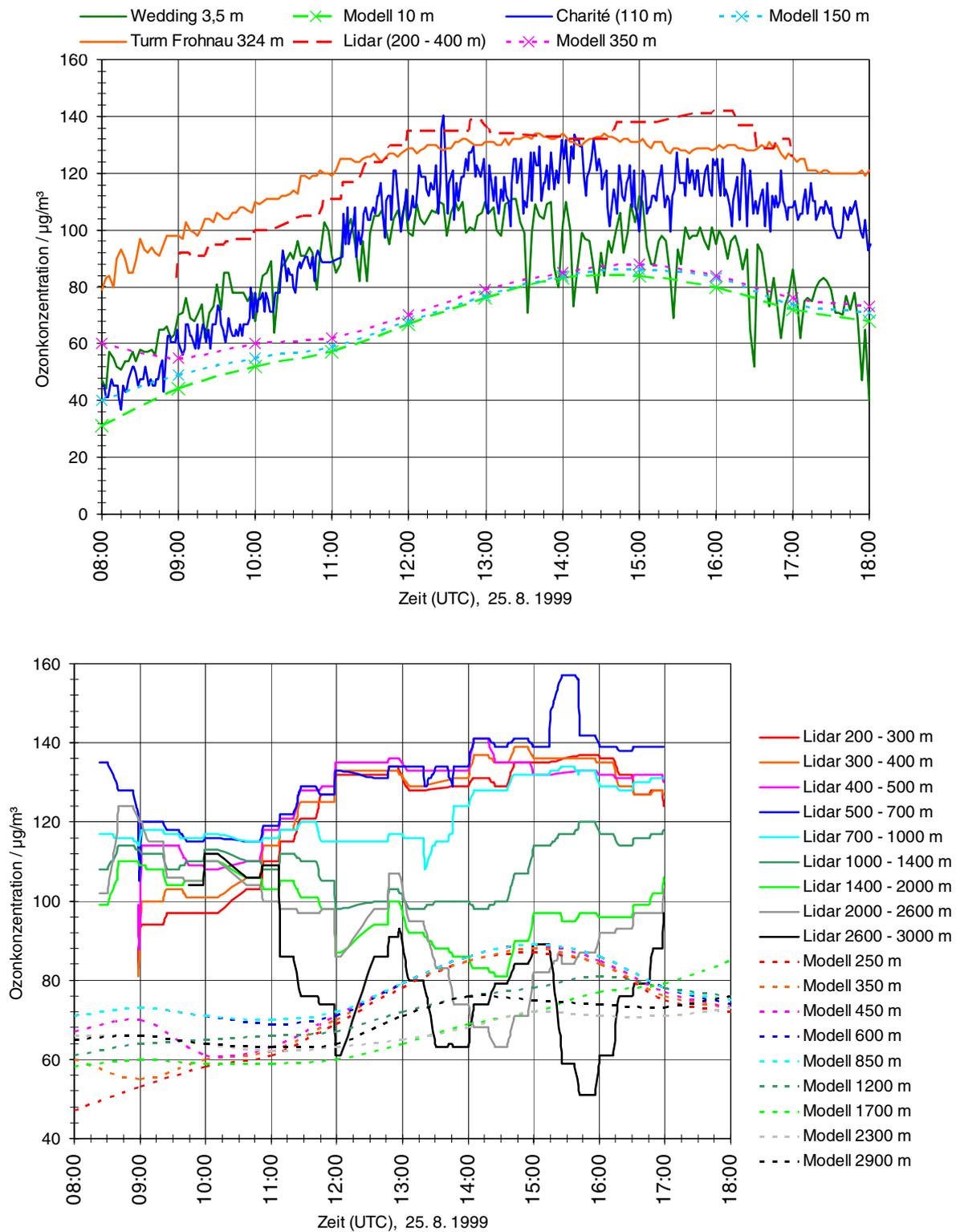
In Abbildung 4-18 sind Vergleichskurven des Verlaufs der Ozonkonzentration für verschiedene Höhenbereiche vom 25. 8. dargestellt. Die Messungen des Berliner Luftgütemessnetzes BLUME zeigen den gleichen Tagesgang wie die Lidar-Messungen in der entsprechenden Höhe, obwohl die Messtation auf einem Turm etwa 8 km nördlich der Lidar-Station ist. Die Modellvorhersage kann das Höhenprofil nicht nachvollziehen. Die Bodenmessungen stimmen am Morgen und am Abend recht gut mit dem Modell überein. Die Tagespitze liegt jedoch bei den Messungen etwa  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  höher. Je größer die Höhe,



**Abb. 4-17** Aerosol-Rückstreukoeffizienten bei 532 nm über der Lidar-Messstation auf der Charité, 28. 8. 1999.

desto größer werden die Abweichungen zwischen Modell und Messung. Die Zeitreihen der Ozonkonzentration in der unteren Grafik in Abbildung 4-18 sind entsprechend der Modellauflösung zeitlich und räumlich gemittelt. In niedrigen Höhen ist der Modellverlauf der Konzentration den Messungen noch sehr ähnlich, wenn auch die Absolutkonzentrationen niedriger liegen. Den Einfluss der nachmittäglichen Front auf die Konzentration oberhalb 700 m wurde aber gar nicht vorhergesehen.

Leider liegen nicht viele derartig geschlossene Messreihen der Ozonkonzentration mit gleichzeitigen kleinskaligen Modellsimulationen vor. Das regnerische Wetter während der BERLIOZ- und der OLAK-Kampagne ließ kaum Smog entstehen. Danach wurden die Ozonvorhersageberechnungen eingestellt. Einige Vergleichstage lassen natürlich noch keine Rückschlüsse auf die Qualität des Modells zu. In dem Beispiel vom 25. 8. 1999 wird aber eine Gefahr deutlich, der bei statistischen Auswertungen der Übereinstimmung von Modell und Messung vorgebeugt werden muss. Das Modell unterschätzte die Ozonwerte, erzeugte aber einen typischen Anstieg der Werte gegen Nachmittag. Zu dieser Zeit fiel die Konzentration oberhalb von 700 m in Zusammenhang mit der Front. Die gefallen gemessenen Werte stimmen in dem Zeitabschnitt mit den gestiegenen Modellwerten überein, weil das Modell die Front und ihre Auswirkung nicht vorhersah. Eine rein statistische Betrachtung könnte zu dem Ergebnis kommen, das die Modellabläufe richtig sind und damit eine



**Abb. 4-18** Tagesgang von Lidar-Ozon-Messungen, BLUME-Messungen und Vorhersagemodell CALGRID am 25. 8. 1999.

falsche Bestätigung geben. Dieses Beispiel unterstreicht die Bedeutung geschlossener Messreihen zur Analyse der Ozonbildungs- und Transportprozesse.

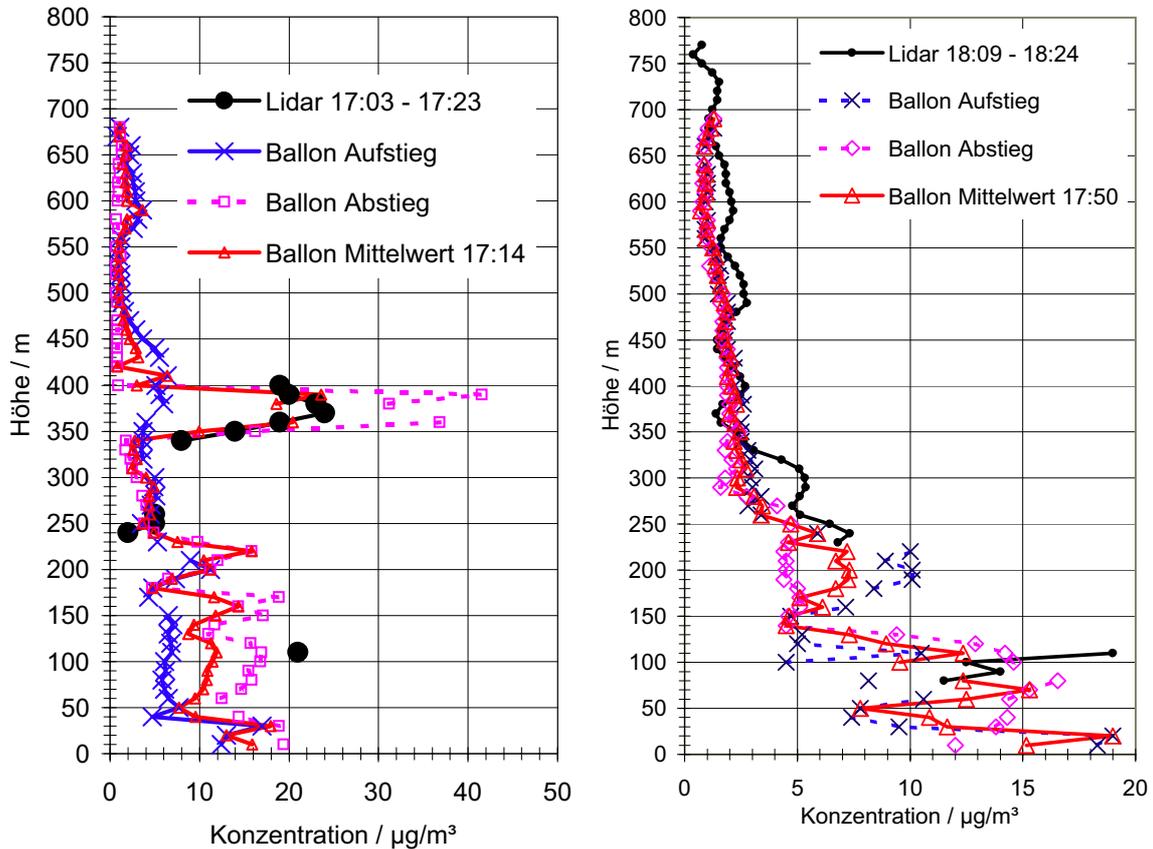
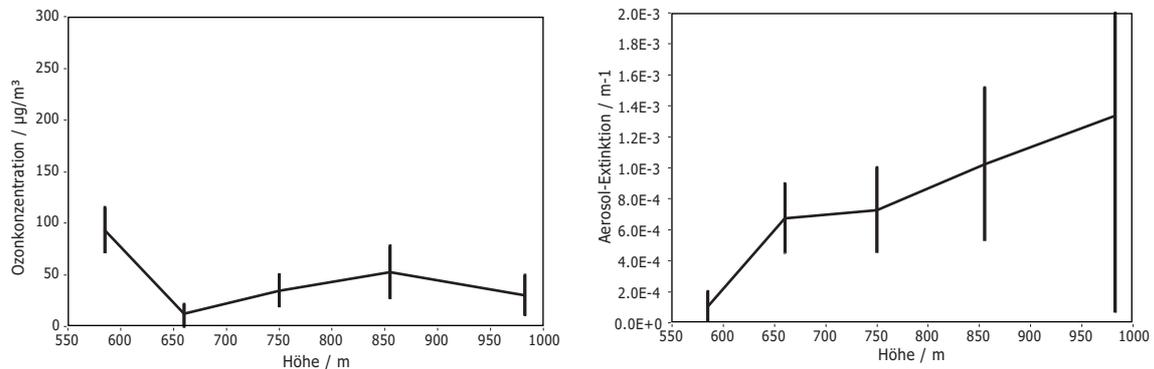


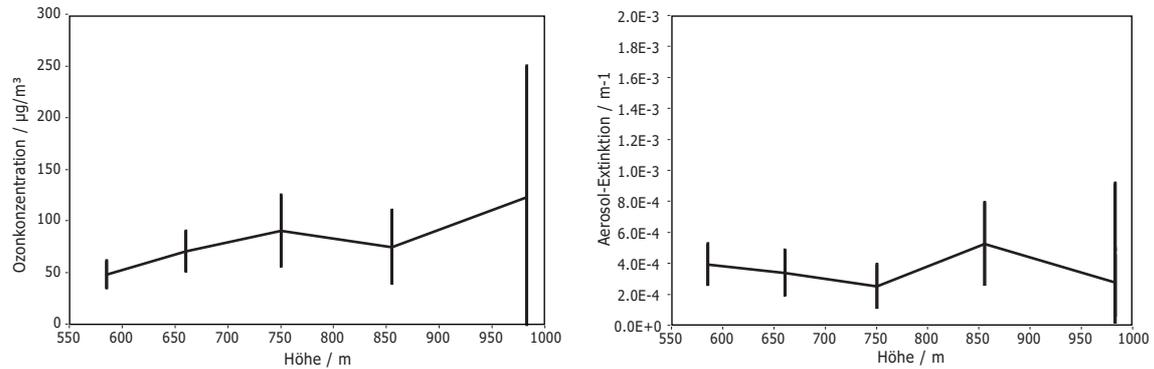
Abb. 4-19 NO<sub>2</sub> Vergleichsmessung 23. 8. 1999 zwischen dem Charité-DIAL und einem Fesselballon.

Während der OLAK-Kampagne wurden auch Vergleichsmessungen von NO<sub>2</sub> durchgeführt. Der Fesselballon war zu diesem Zweck mit einem Sensor ausgestattet. Eine Schwierigkeit stellen die niedrigen NO<sub>2</sub>-Konzentrationen in der Berliner Luft dar, die meist unterhalb der Nachweisgrenze des Lidar liegen. Nur in der Nacht, wenn eine niedrige Bodeninversion die Autoabgase am Verflüchtigen hindert und gleichzeitig keine Photochemie abläuft, steigen die Konzentrationen auf messbare Werte an. Die linke Grafik in Abbildung 4-19 zeigt eine kurzzeitige Ausnahmesituation. Sowohl der Ballon als auch der Laserstrahl haben eine NO<sub>2</sub>-Schicht in 350 bis 400 m Höhe erfasst. Dabei handelt es sich sehr wahrscheinlich um Abgase des Kraftwerks in Spandau, dessen Rauchfahne beim Verlassen des Schlots in die Richtung des Messvolumens zeigte, dort aber schon nicht mehr sichtbar war. Die Messungen wurden als Scan mit dem großen Umlenkspiegel durchgeführt. Um die Konzentrationspitze zu erfassen, konnten nur Daten aus einem kleinen Entfernungsbereich benutzt werden. Deshalb sind nur so wenige Messpunkte aufgetragen. Bei der Messung nach einer Stunde (rechte Abbildung) war die NO<sub>2</sub>-Spitze nicht mehr zu finden.

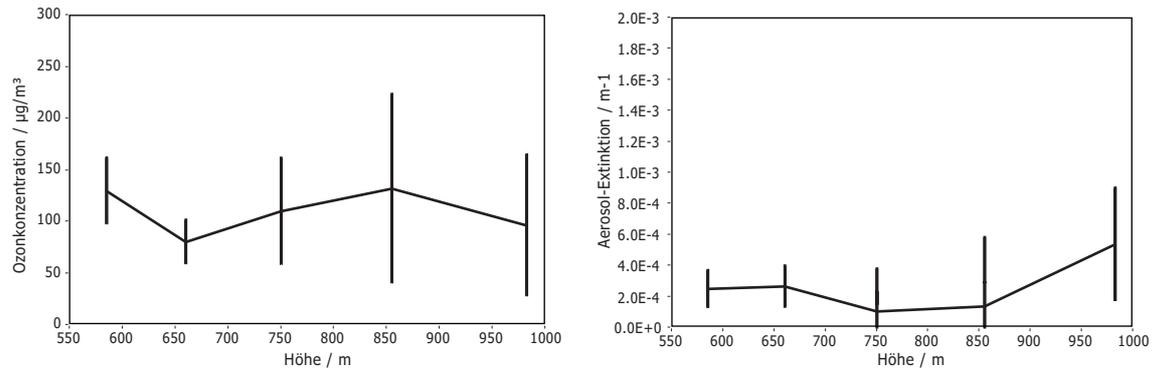
Ozon-Konzentration 29. 5. 2001, 16:45 bis 17:15 Uhr Aerosol-Extinktion 29. 5. 2001, 16:45 bis 17:15 Uhr



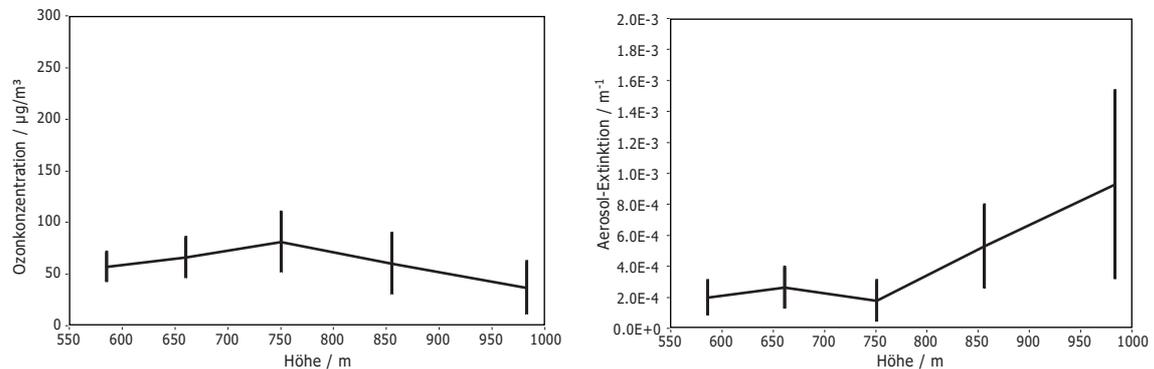
Ozon-Konzentration 29. 5. 2001, 19:15 bis 19:45 Uhr Aerosol-Extinktion 29. 5. 2001, 19:15 bis 19:45 Uhr



Ozon-Konzentration 29. 5. 2001, 21:00 bis 21:30 Uhr Aerosol-Extinktion 29. 5. 2001, 21:00 bis 21:30 Uhr



Ozon-Konzentration 1. 6. 2001, 15:30 bis 16:00 Uhr Aerosol-Extinktion 1. 6. 2001, 15:30 bis 16:00 Uhr



**Abb. 4-20** Vibrations-Raman-DIAL: Ozonkonzentrations- und Aerosol-Extinktions-Messungen in Berlin-Dahlem.

Mit dem neu entwickelten Raman-DIAL-Lidar wurden erste Testmessungen durchgeführt, um die Funktionsfähigkeit der Idee zu zeigen und die erforderlichen Gerätschaften und Komponenten zu spezifizieren. In Abbildung 4-20 sind erste Ergebnisse dargestellt. Das Prinzip erlaubt es, ohne Annahmen unbekannter Größen Ozonkonzentration und UVB-Aerosol-Extinktion zu messen. Die Fehlerbalken der Ergebnisse sind recht groß, da die provisorische Messanordnung zu schlechten Signal-zu-Rausch-Verhältnissen der Signale führte. Mit der Testanordnung wurden Reichweiten von ca. 1 km bei einer Mittlungsdauer von einer halben Stunde erreicht.

Die Vergleichsmessungen haben gezeigt, dass mit dem DIAL-Verfahren sehr wertvolle und mit anderen Methoden übereinstimmende Ergebnisse erzielt werden können. Bei der Bedienung der Messgeräte ist auf strikte Einhaltung der Protokolle zu achten, um subjektive Fehleinschätzungen bei der Justage zu vermeiden. Das Lidar der Freien Universität auf der Charité wurde immer zu Ausbildungszwecken genutzt, was dazu führt, dass die Bediener aufhören zu messen, wenn sie eine ausreichende Routine erworben haben. Diese Erfahrung hat gezeigt, dass DIAL-Geräte für den Einsatz in der Atmosphärenforschung kaum Spielraum für Veränderungen von Parametern haben sollten, um eine gleichbleibende Qualität zu gewährleisten. Die Aerosol-DIAL-Methode trägt bei bestimmten Bedingungen sehr zur Verbesserung der berechneten Ozonkonzentration bei. Voraussetzung sind jedoch realistische Annahmen über die Streueigenschaften des Aerosols im UV. Auf der Charité werden sie gleichzeitig mit einem zweiten Lidar gemessen. Das erhöht natürlich den technischen Aufwand beträchtlich und es entstehen neue Fehlerquellen, wenn so viele komplizierte Geräte gleichzeitig betrieben werden müssen. An dieser Stelle wird der Vorzug der neuen Raman-DIAL-Methode deutlich. Es ist nur ein einziger industrietauglicher, kommerziell erhältlicher Laser erforderlich, um alle Informationen zu erhalten.

## 4.4 Temperatur

Über die Temperaturmessungen ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht viel zu berichten. Das System wurde bisher nicht bei Messkampagnen eingesetzt. Einen Anhaltspunkt für die Plausibilität der Messwerte, aber keinen echten Vergleich, lieferte die Radiosonde der nahe Berlin gelegenen Station des Deutschen Wetterdienstes in Lindenberg. Das ist bisher die einzige Möglichkeit, die Qualität der nötigen Spektrenanpassung durch unabhängige Messungen zu überprüfen.

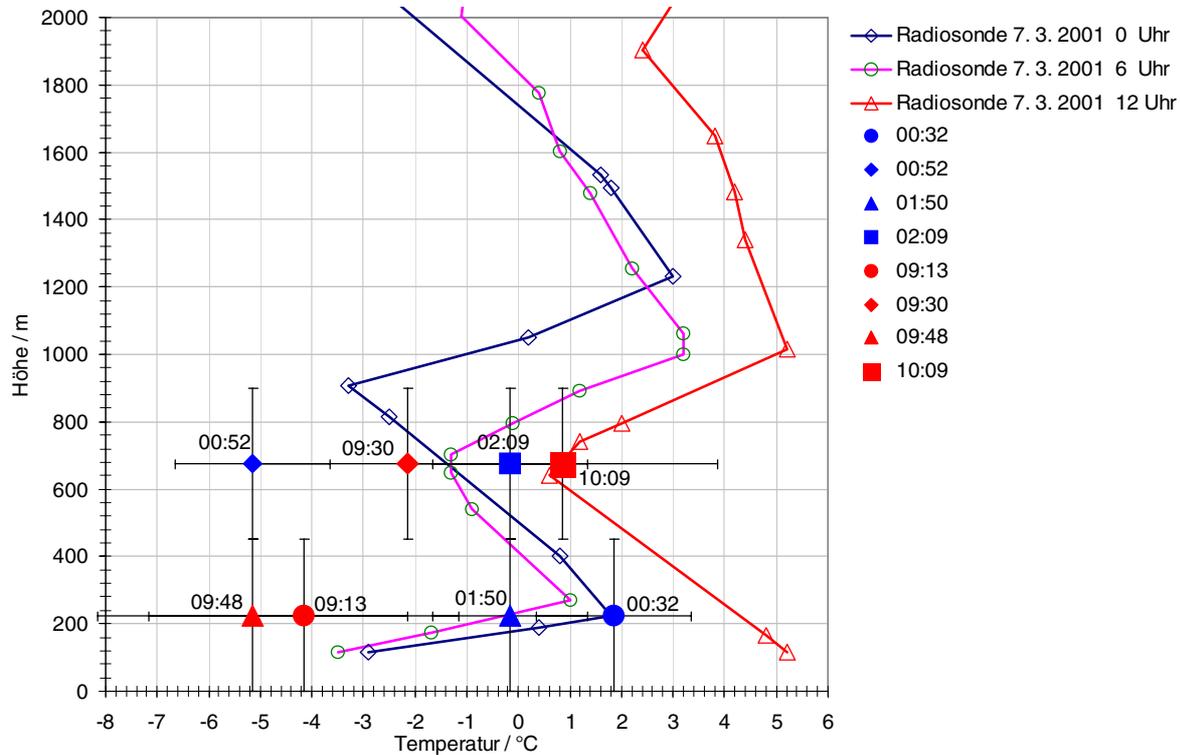


Abb. 4-21 Vergleich von Rotations-Raman- und Radiosonden-Temperaturmessungen.

Die Messwerte des Lidar in Berlin und der Radiosonde in Lindenberg können als übereinstimmend betrachtet werden.

Die verwendete Rotations-Raman-Methode, bei der mit einer Kamera die kompletten Spektren aufgenommen werden, ist für die Bestimmung der Temperatur in der planetaren Grenzschicht sehr gut geeignet. Die Messung muss nicht kalibriert werden und die Auswertung kann direkt am Boden beginnen, da man bei der Auswertung nicht auf eine konstante Gerätefunktion angewiesen ist. Das ist ein für Routinemessungen sehr interessantes Ergebnis. Mit der neu entwickelten Kurvenanpassungsmethode sind auch keine speziellen schmalbandigen Laser für die Messungen notwendig. Vorhandene Aerosol-Lidar-Systeme können mit einer entsprechenden Detektion, bestehend aus einem Spektrometer und einer Kamera, nachgerüstet werden.