

Fernerkundung der Atmosphäre mit flugzeuggetragenen Lidarsystemen

Gerhard Ehret, Wolfgang Renger, Uwe Rösler,
Christian Kiemle, Georg Simmet und Gerhard Ruppersberg
DLR, Institut für Physik der Atmosphäre

Abstract

The laser, today, is an important tool in atmospheric physics. As the light source of backscatter LIDARs it is used to measure spatial and temporal distributions of clouds and aerosols, and, using additional assumptions, also of their optical properties. Wind velocities are mapped by backscatter Doppler LIDAR systems. Raman LIDARs are to be used for the supervision of factory emissions. DIAL systems, although technically being very pretentious, offer considerable physical advantages in measuring atmospheric constituents; experiences with an airborne device are described.

1. Einleitung

Der Laser ist eine Lichtquelle, die in der Natur nicht vorkommt und deren Strahlung auf dem Prozeß der "Stimulierten Emission" beruht. Aufgrund seiner extrem monochromatischen Strahlung, hohen Leistung, extremen Schmalbandigkeit, dem weiten Bereich des Spektrums das er, sogar durchstimmbare, erfaßt, hat er heute seinen festen Platz in Wissenschaft, Technik, Medizin und Umweltforschung gefunden. Auch in der Atmosphärenforschung spielt der Laser eine zunehmend bedeutende Rolle. Beispielsweise ermöglichen Laser wegen der geringen Bandbreite und der Möglichkeit des Abstimmens auf eine bestimmte Frequenz, atmosphärische Spurengase selektiv zu detektieren und deren Konzentrationen oder Mischungsverhältnisse mit der Umgebungsluft quantitativ zu bestimmen. Insbesondere sind die anthropogenen Spurengase und Schadstoffe von Bedeutung, denn sie sind in der Regel in der Atmosphäre chemisch wirksam und beeinflussen die natürlichen Stoffkreisläufe auch anderer Spurengase und damit die chemische Zusammensetzung der Erdatmosphäre und durch Auswaschprozesse auch die des Erdbodens.

2. Das Lidarprinzip

Für die Bestimmung der räumlichen Variabilität der Schadstoffkonzentrationen in der Atmosphäre sind Lidar-(Light Detection and Ranging) Systeme geeignet, die in Analogie zum Radar als Sender gepulste Laser verwenden (Bild 1). Sie sind im Prinzip vergleichbar mit Radaranlagen. Ein leistungsstarker Laser sendet einen kurzen elektromagnetischen Puls in die Atmosphäre. Nur ein kleiner Bruchteil der ausgesandten Strahlung wird in der Atmosphäre wieder zum Sender zurückgestreut, wo er mit einem geeigneten Empfänger nachgewiesen wird. Aus der Laufzeit des Lichtes vom Sender zum streuenden Medium und wieder zurück, können die Entfernung und die Ausdehnung des streuenden Mediums in Laserstrahlrichtung präzise bestimmt werden, sofern das gemessene Signal ausreicht.

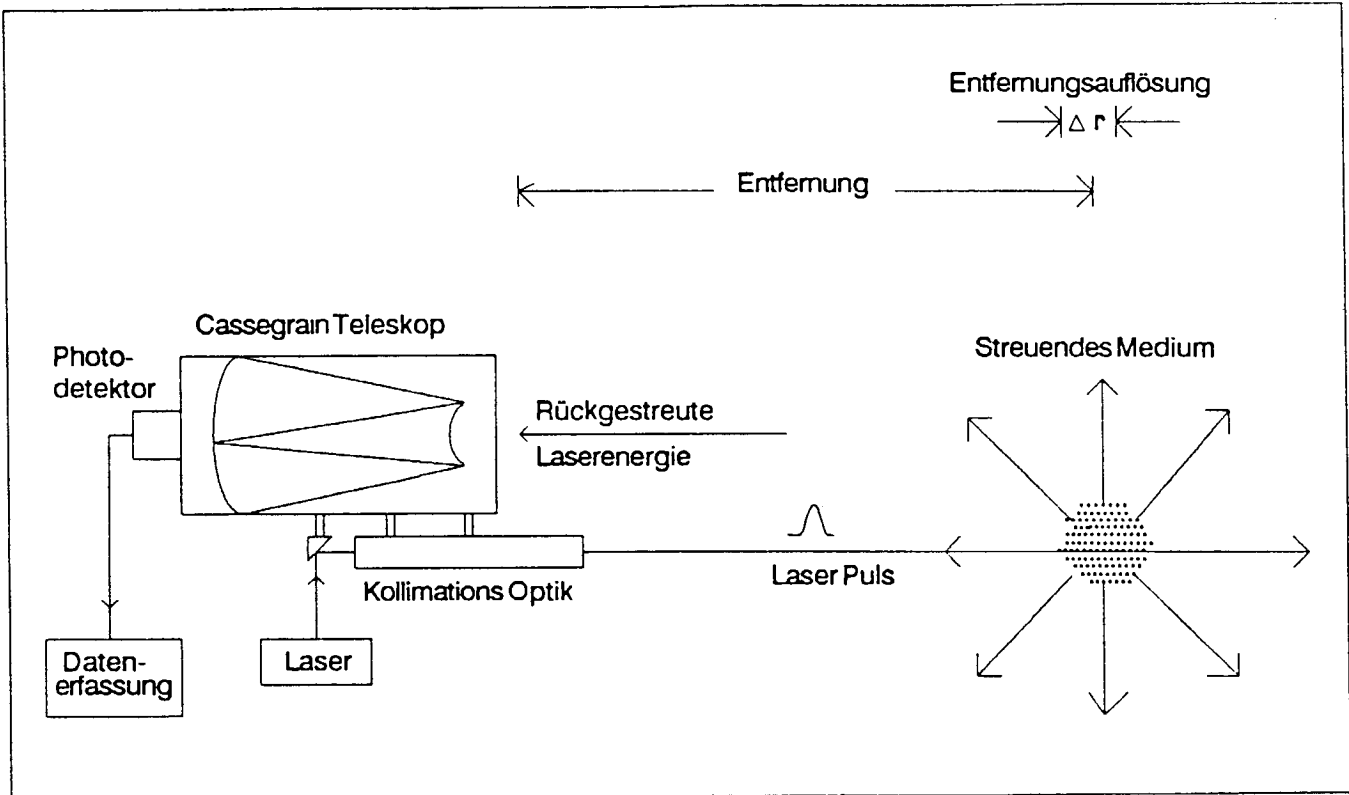


Bild 1: Schematische Darstellung eines Rückstreulidars

Die in der Atmosphäre zum Empfänger zurückgestreute Lichtmenge pro Entfernungintervall ("Abtastintervall") Δr läßt sich bei der Verwendung von kurzen Pulsen mit folgender Lidargleichung beschreiben:

$$(1) \quad \Delta N(\lambda, r) = N_o(\lambda) \cdot H \cdot A \cdot \Delta r \cdot (1 + Q_{ms}(\lambda, r)) \cdot \frac{\beta(\lambda, r) \cdot \tau^2(\lambda, r, 0)}{r^2} .$$

$\Delta N(\lambda, r)$ ist die Zahl der gemessenen Photoelektronen je Abtastintervall Δr in Abhängigkeit der Entfernung r und Wellenlänge λ ; Δr ist gleichzeitig die maximale Entfernungsaufloesung des Systems. $N_o(\lambda)$ ist die Zahl der ausgesandten Laserphotonen pro Puls, H die Systemeffizienz, A die effektive Spiegeloberfläche des in Bild 1 gezeigten Cassegrain-Teleskopes. $Q_{ms}(\lambda, r)$ ist der Quotient aus mehrfach und einfach (= regulär) gestreutem Anteil der empfangenen Strahlung. Ungefähr ab optischen Dicken von 0.1 - in Cirruswolken aber schon bei einigen 0.01 - muß er mit Zweifachstreuung, ab ca. 0.3 mit den höheren Streuordnungen berücksichtigt werden; diese Grenzen hängen aber stark vom Empfangsraumwinkel des Teleskops ab und ebenso von der Streufunktion der lichtstreuenden Materie im Meßvolumen. Die Lidargleichung gilt im sog. Fernfeld, in dem der Laserstrahl nahezu vollständig im Gesichtsfeld des Teleskops liegt. Dort fällt das gemessene Signal also mit $1/r^2$ schnell ab. Zum Nachweis von Signalen aus einem großen Entfernungsbereich braucht der Empfänger deswegen eine hohe Dynamik.

$\tau(\lambda, r, 0)$ ist der Grad der gerichteten Transmission der Atmosphäre für die Laserstrahlung der Wellenlänge λ zwischen dem Lidarsystem ($r' = 0$) und der Meßentfernung $r' = r$:

$$(2) \quad \tau(\lambda, r, 0) = \exp\left[-\int_0^r \sigma_e(\lambda, r') \cdot dr'\right] .$$

Der Rückstreuoeffizient $\beta(\lambda, r)$ in Gleichung (1) beschreibt das Rückstreuvermögen der Atmosphäre, der Extinktionskoeffizient $\sigma_e(\lambda, r)$ bestimmt die Transmission der Strahlung. β und σ_e lassen sich als Produkt aus Teilchenzahldichte und zugehörigen teilchenspezifischen Streu- oder Wirkungsquerschnitten beschreiben. Hierbei unterscheidet man:

- Streuung und Reflexion an nicht gasförmigen Substanzen

Bei der Wechselwirkung der ausgesandten Strahlung mit nicht gasförmigen atmosphärischen Bestandteilen wie Aerosolen, Staub- und Rauchpartikeln, Wolken etc. hängt das Streu- und Absorptionsvermögen stark vom Brechungsindex der jeweiligen Teilchen und deren Geometrie ab. Diese Art der Wechselwirkung bezeichnet man als Mie-Streuung. Bei bekannten Größenverteilungen und Brechungsindizes der streuenden Teilchen lassen sich Streuung und Absorption mit einem Mie-Lidar ermitteln. Sind die optischen Eigenschaften der streuenden Teilchen nicht bekannt - und dies ist der Normalfall - so können dennoch mit einem Mie-Lidar Fernmessungen von Aerosoldichteverteilungen in Smog- bzw. Inversionslagen durchgeführt und die Ausbreitung von Rauchfahnen mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung untersucht werden. Wegen der Dopplerverschiebung, die das Laserlicht bei der Rückstreuung an bewegten Aerosolteilchen in der Atmosphäre erfährt, können auch Windkomponenten in Ausbreitungsrichtung des Laserstrahls gemessen werden.

- Streuung an Luftmolekülen

Bei der Wechselwirkung des Laserlichtes mit den molekularen Bestandteilen der Atmosphäre tritt Rayleigh- und Ramanstreuung auf. Diese Streuung läßt sich theoretisch als "Zwei-Photonen"-Prozeß beschreiben, bei dem ein Photon "absorbiert" und ein zweites entweder mit der gleichen Wellenlänge (Rayleigh) oder etwas wellenlängenverschoben (Raman) sofort wieder "emittiert" wird. Die Wellenlängendifferenz zwischen dem ausgesandten Laserlicht und dem gestreuten Licht ist charakteristisch für das jeweilige Molekül, das für die Streuung verantwortlich ist, und kann zur Selektion eines bestimmten Spurengases verwendet werden, dessen Konzentration bestimmt werden soll. Voraussetzung hierfür sind bekannte Ramanstreuquerschnitte und eine hinreichend große Teilchenzahldichte des zu vermessenden Spurengases in der Atmosphäre, da dieser Streuprozeß sehr kleine Wirkungsquerschnitte aufweist. Die Ramanstreuintensität nimmt zu größeren Wellenlängen hin stark ab, deshalb werden Ramanlidars auch überwiegend im UV-Bereich betrieben. Als Einsatzmöglichkeit eines Ramanlidars wird beispielsweise die Überwachung von Chemieanlagen diskutiert, da mit solch einem System eine Vielzahl von Molekülen gleichzeitig mit hoher räumlicher Auflösung gemessen werden kann.

- Molekulare Absorption

Spurengase besitzen ausgeprägte Absorptionsspektren im ultravioletten, sichtbaren und infraroten Spektralbereich. Liegt die Wellenlänge des ausgesandten Laserlichtes innerhalb einer Absorptionsbande des betrachteten Moleküls, so tritt eine merkliche Schwächung der Strahlung auf, die ein Maß für den Spurengasgehalt in der Atmosphäre darstellt. Bei bekannten molekularen Absorptionsquerschnitten können mit einer zusätzlichen Referenzmessung bei Wellenlängen, bei denen das Spurengas nicht oder nur wenig absorbiert, die Teilchendichten entfernungs aufgelöst ermittelt werden. Diese Differential-Absorptions-Lidar Methode ist sehr empfindlich und eignet sich besonders für den Nachweis der klimarelevanten Spurengase und Schadgase

NO , NO_2 , SO_2 , O_3 im ultravioletten Spektralbereich und von meteorologischen Parametern wie Druck, Temperatur und Wasserdampf im nahen Infraroten.

3. Aerosol-Lidar-Experiment (ALEX-F)

Das Institut für Physik der Atmosphäre setzt seit Jahren das Mie-Lidar ALEX-F in verschiedenen Flugzeugen insbesondere bei multidisziplinären Meßkampagnen ein, um Partikelverteilungen im Raum unter und über dem Flugzeug zu messen (Mörl et al., 1981). Der Sender dieses Systems besteht aus einem Nd:YAG-Laser, der auf der Grundwellenlänge bei 1064 nm und auf der verdoppelten bei 532 nm in die Atmosphäre emittiert. Die zurückgestreuten Photonen werden mit einem Cassegrain-Teleskop aufgefangen und mit einer Photodiode oder einem Photomultiplier nachgewiesen und mit sehr hoher Geschwindigkeit und dementsprechender Entfernungsauflösung (bis zu 1,5 m), digitalisiert. Kästner et al. (1991; s. Beitrag im vorliegenden Band) beschreibt eine Anwendung.

4. Das Differential-Absorptions-Lidar

Zusätzlich zum ALEX-System wurde in den letzten Jahren ein Differential-Absorptions-Lidar (DIAL) entwickelt und aufgebaut, mit dem Aerosol- und Wasserdampfverteilungen in der Atmosphäre vom Flugzeug aus großräumig gemessen werden können. Ein DIAL emittiert - nahezu gleichzeitig mit zwei Lasern oder kurz nacheinander mit einem Laser - je einen Laserpuls auf einer "on-line"- Wellenlänge λ_1 , bei der das gesuchte Gas eine Absorptionslinie mit großem Absorptionsquerschnitt $\sigma_{G,1}$ hat und auf einer nahebei liegenden "off-line"- Wellenlänge λ_2 mit möglichst kleinem Absorptionsquerschnitt $\sigma_{G,2}$. Die Differenz der Signalaare aus zwei verschiedenen Meßentfernungen r_1 und r_2 liefert aufgrund der Gleichungen (1) und (2) - bis auf zwei Korrekturterme, die beim H_2O -DIAL zu vernachlässigen sind, wenn die Atmosphäre wenigstens zwischen den beiden Laserpulsen horizontalhomogen ist - die folgende "DIAL-Gleichung":

$$(3) \quad N_G = \frac{1}{2 \cdot (r_2 - r_1) \cdot (\sigma_{G,1} - \sigma_{G,2})} \cdot \ln \left[\frac{\Delta N(\lambda_1, r_1) \cdot \Delta N(\lambda_2, r_2)}{\Delta N(\lambda_2, r_1) \cdot \Delta N(\lambda_1, r_2)} \right].$$

N_G ist die mittlere Gaskonzentration (Moleküle/Volumeneinheit) im Auswertintervall $r_2 - r_1$. Die DIAL-Gleichung enthält - außer den bekannten Gas- Absorptionsquerschnitten und dem Auswertintervall - nur noch Quotienten der gemessenen Photonenzahlen. Bei der Quotientenbildung entfallen alle System- und Meßparameter der Gleichung (1), bis auf die vier bei den Wellenlängen λ_1 und λ_2 in den Entfernungen r_1 und r_2 tatsächlich gemessenen relativen Counts (Kästner et al., 1991; dort Gleichungen (1) und (2)); Kalibrierungen des Systems sind deswegen nicht erforderlich, Mehrfachstreuung stört die Messung nicht, und die gemessene Größe ist auch unmittelbar die gesuchte Größe. Das sind sehr große Vorteile des - technisch allerdings sehr anspruchsvollen - DIAL-Verfahrens gegenüber anderen Fernerkundungsmethoden und sogar auch gegenüber vielen In-Situ Meßverfahren.

Das flugzeuggetragene H_2O -DIAL der DLR wird bereits operationell eingesetzt (Ehret, 1989). Im Rahmen einer Diplomarbeit wurde es weiterentwickelt, um damit Ozon und später auch NO_2 im ultravioletten Spektralbereich messen zu können (Rösler, 1990; Ehret et al., 1991). Ozon absorbiert nahezu die gesamte Solarstrahlung im Bereich 230-310 nm, die nicht von den Hauptgasen der Atmosphäre, Sauerstoff

und Stickstoff, absorbiert werden kann und die sonst die Erdoberfläche erreicht. Ozon bildet somit eine Schutzschicht gegen die kurzwellige UV-Strahlung der Sonne. Da die Absorption im wesentlichen in der Stratosphäre erfolgt und dort zu einem Temperaturanstieg führt, bestimmt Ozon auch die Stabilität bzw. Dynamik der Atmosphäre in dieser Höhe. Auch in der Troposphäre ist Ozon an vielen chemischen und photochemischen Vorgängen beteiligt. Seine Konzentration wird stark von den anthropogen vorhandenen Stickoxyden beeinflusst. Für die Fernerkundung von Ozon mit dem DIAL-Verfahren im UV eignet sich die Absorptionsbande zwischen 280-350 nm (Huggins), weil dort der Absorptionsquerschnitt einen großen Dynamikbereich von nahezu 3 Größenordnungen kontinuierlich überdeckt. Damit kann ein DIAL das Ozon in der Troposphäre bei Mischungsverhältnissen von ca. 10 bis 100 ppb (Volumenanteile auf 10^9) und in der Stratosphäre von 0.1 bis 10 ppm (Volumenanteile auf 10^6) mit hoher Empfindlichkeit messen.

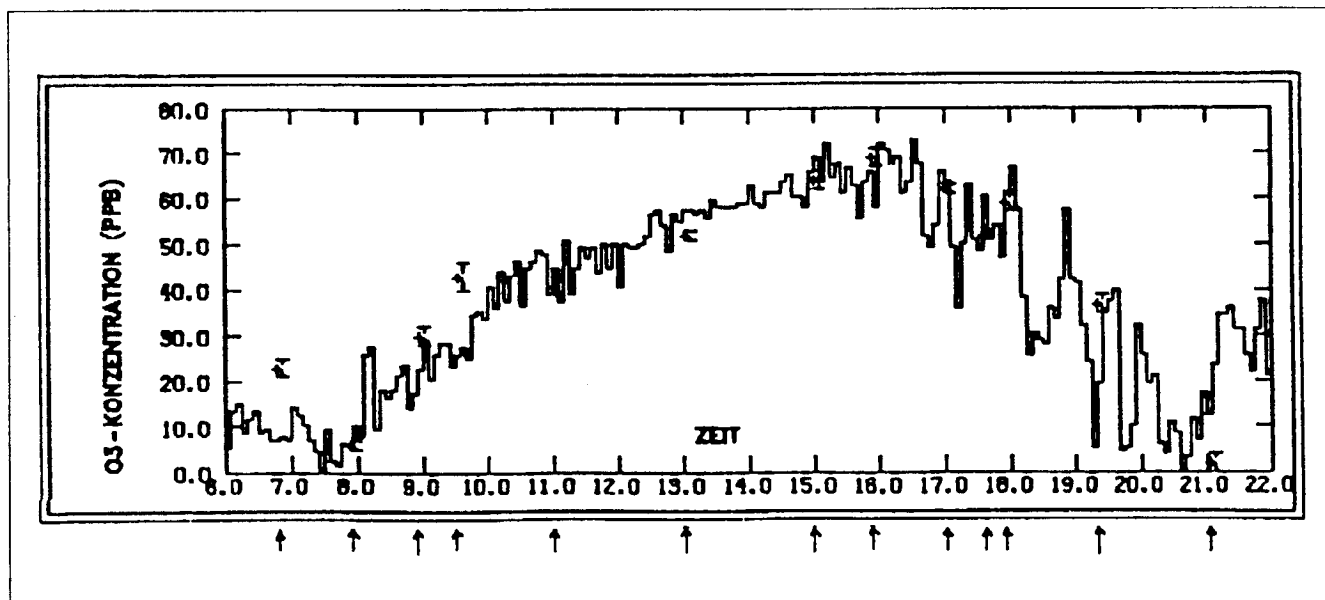


Bild 2: Ozontagesgang vom 19. März 1990. Die Pfeile zeigen zu den Meßwerten des DIAL-Systems; die durchgezogene Linie gilt für die In-Situ Messungen.

Bild 2 zeigt, als Beispiel, den Ozon- Tagesgang vom 19. März 1990 über dem Flugplatz Oberpfaffenhofen. Er wurde mit unserem O_3 -DIAL vom Labor aus gemessen und gleichzeitig, vor Ort, mit einem In-Situ Chemolumineszenzverfahren kontrolliert. Aufgrund der intensiven Sonneneinstrahlung gibt es an diesem Tage gegen 16.00 Uhr ein ausgeprägtes Ozonmaximum mit Spitzenwerten bis zu 70 ppb. Beide Geräte zeigen den Verlauf in guter Übereinstimmung.

Als typisches Meßbeispiel für das flugzeuggetragene H_2O -DIAL der DLR zeigt Bild 3 einen Querschnitt durch die geschichtete Atmosphäre zwischen etwa 4000 m Höhe NN und dem Boden auf der Strecke Frankfurt/Main (links) und Würzburg (rechts) am Mittag des 17. Mai 1989. Der obere Teil (a) ist eine farbkodierte Darstellung der relativen, d.h. mit r^2 multiplizierten Counts von dem "off-line" Laserpuls. Die sprunghafte Änderung in 2500 m NN weist auf eine ausgeprägte Inversion hin. Darunter ist das Aerosol offenbar stark gequollen; an einzelnen Stellen, insbesondere in dem gegen 15:57:40 Uhr MESZ überflogenen Bereich, bilden sich vom Flugzeug aus gerade erkennbare, transparente Wolken. Das entsprechende (hier nicht wiedergegebene) Bild vom "on-line" Laserpuls zeigt nahezu die gleiche Struktur, insgesamt aber etwas kleinere, weil stärker absorbierte Signale. Quotientenbildung der in diesen

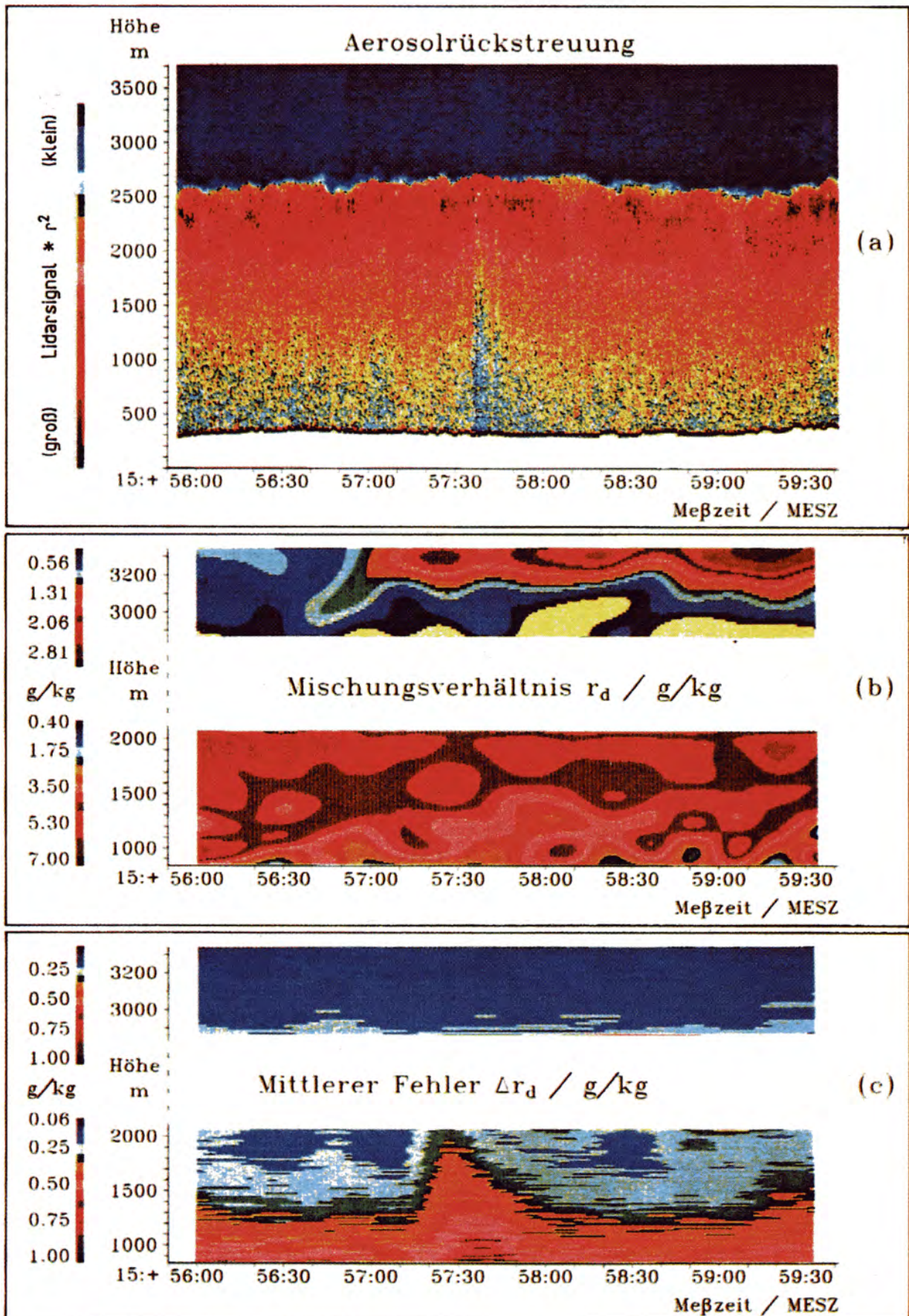


Bild 3: Querschnitt durch eine geschichtete Atmosphäre vom 17.5.1989 zwischen Frankfurt/Main (links) und Würzburg (rechts) mit dem flugzeuggetragenen H₂O-DIAL der DLR. (a) Aerosolrückstreuung, (b) Wasserdampf- Mischungsverhältnis, r_d, (c) Mittlerer Fehler des Mischungsverhältnisses, Δr_d.

Bildern dargestellten relativen Counts (gemäß Gleichung (3) und daran anschließendem Text) führt zum Wasserdampf-Mischungsverhältnis im gleichen Atmosphärenschnitt (Bild 3b). Unter der Inversion erkennt man deutlich die durch Konvektion verursachte blasige Struktur der Wasserdampfkonzentration. Die freie Atmosphäre darüber enthält, wie nicht anders zu erwarten, weniger Wasserdampf; oberhalb von 3000 m NN wird eine Zunge feuchterer Luft angeschnitten, die zu dieser Zeit gerade in dieses Gebiet eindringt. Im Inversionsbereich selbst ist noch keine Auswertung möglich, weil das Flugzeug zwischen den Emissionen von off-line und on-line Puls unseres Ein-Laser DIALs etwa 20 m zurücklegt und der Inversionsbereich auf dieser Strecke schon deutlich horizontalinhomogen ist. Mit der Kalibrierung des Systems aus den gemessenen Werten (Kästner et al., 1991) lassen sich aber möglicherweise die beiden vor Gleichung (3) erwähnten Korrekturterme hinreichend genau bestimmen; daran wird gearbeitet. Damit würde die Messung des Wasserdampf- Mischungsverhältnisses auch im horizontal sehr inhomogenen (aber große Signale liefernden) Bereich von Inversionen, Cirruswolken oder Kondensstreifen mit dem Ein-Laser DIAL möglich.

Bild 3c schließlich zeigt die mittleren Fehler der Mischungsverhältnisse von Bild 3b: Unter der Inversion, z.B., liegen sie meistens zwischen 6% und 26%, nur im Abschattungsbereich der in Bild 3a erkennbaren stärkeren Wolke steigen sie deutlich auf Werte zwischen 11% und 31% an. Alles in allem verdeutlicht das Bild einen der grundsätzlichen Vorzüge des DIAL-Verfahrens, neben den nach Gleichung (3) bereits erwähnten: Auch die Meßfehler folgen unmittelbar aus den Meßwerten - ohne Kalibrierungen oder zusätzliche Annahmen.

Literatur:

- Ehret G., 1989: Wasserdampf-Differential-Absorptions-Lidar: Methode und technische Realisierung im Flugzeug. DLR-Nachrichten 58, 25 - 28.
- Ehret, G., Renger, W. und U. T. Rösler, 1991: Schadstoffe in der Luft. Laser-Fernerkundung atmosphärischer Spurengase und Schadstoffkonzentrationen. DLR-Nachrichten 63, 8 - 11.
- Kästner M., Kriebel K.-Th., Meerkötter R., Renger W., Ruppertsberg G. und P. Wendling, 1991: Cirren und Kondensstreifen am 18.10.89 über der Nordsee (ICE '89): Ermittlung von Höhe und optischer Dicke mit ALEX, AVHRR und HIRS. In: Schumann U. und K. P. Hoinka (Eds.), "Beiträge zur Physik der Atmosphäre, gewidmet Dr. Manfred Reinhardt". Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt. Forschungsbericht, DLR-FB 1991, 107 - 123.
- Mörl, P., Reinhardt, M. E. und W. Renger, 1979: ALEX-F ein Fernerkundungssystem für die Umweltforschung. DLR-Nachrichten 27, 26 - 28.
- Mörl, P., Reinhardt, M. E., Renger, W. and R. Schellhase, 1981: The use of the airborne LIDAR system "ALEX F1" for aerosol tracing in the lower troposphere. Beitr. Phys. Atmos., 54, 403 - 410.
- Rösler U. T., 1990: Bau und Erprobung eines Ozon-Differential-Absorptions-Lidars. Technische Universität München, Diplomarbeit, Juli 1990. 77 p.