

Laser-Fernerkundung der Atmosphäre

Bösenberg, Jens

Max-Planck-Institut für Meteorologie

Abteilung - Klimaprozesse

Forschungsgebiet: Geo- und Klimaforschung

Korrespondierender Autor: Bösenberg, Jens

E-Mail: boesenberg@dkrz.de

Zusammenfassung

Die Fernerkundung der Atmosphäre mit Lidar, das sind dem Radar verwandte Systeme, bei denen kurze Lichtimpulse anstelle von Radiowellen ausgesandt und analysiert werden, gewinnt zunehmend an Bedeutung für die Untersuchung atmosphärischer Prozesse sowie für die Routinebeobachtung. Aus dem zurückgestreuten Licht lassen sich Informationen über zahlreiche atmosphärische Parameter herleiten, und zwar mit guter Höhenauflösung. Diese Höhenauflösung, die auf der Laufzeitmessung für die Lichtimpulse basiert, macht Lidarverfahren besonders attraktiv für die Messung von Parametern, die eine starke vertikale Variabilität aufweisen. Zu diesen Größen, die mit anderen Verfahren nur unzureichend bestimmt werden können, gehören der Wasserdampf und die Aerosole. Am MPI für Meteorologie wurden spezielle Verfahren und Instrumente der Laserfernerkundung entwickelt, die eine genaue Bestimmung der Vertikalverteilung des Wasserdampfes ermöglichen, und zwar kontinuierlich und mit hoher zeitlicher und vertikaler Auflösung. Dies wird am Beispiel einer Messung aus einem internationalen Vergleichsexperiment demonstriert. Für die Aerosolforschung bestand ein großes Problem darin, dass weltweit keine systematischen Messungen der Vertikalverteilung vorlagen, die für ein größeres Gebiet repräsentativ sind. Durch Aufbau eines europaweiten Lidar-Messnetzes, EARLINET, das standardisierte Verfahren mit eingehender Qualitätskontrolle und ein systematisches Schema für die Durchführung und Archivierung der Messungen benutzt, konnte unter Führung des MPI ein umfangreicher Datensatz gesammelt werden. Die Messungen lassen schon jetzt statistisch signifikante Aussagen über wichtige Aerosoleigenschaften zu, für weitergehende Analysen werden sie fortgesetzt.

Abstract

Remote sensing of the atmosphere using lidar becomes increasingly important for studies of atmospheric processes as well as for routine observations. Lidar is an acronym for methods which are analogous to radar but use light instead of radio-waves. From the backscattered light information about numerous atmospheric parameters can be derived with excellent height resolution. The vertical resolution which is based on the measurement of the travel time for the light pulses makes lidar particularly attractive for studies of those parameters that show a strong variability in the vertical. Among the most important parameters which can only insufficiently be retrieved by other methods are water vapour and aerosols. Special methods and instruments are developed at the MPI for Meteorology which allow a continuous determination of water vapour profiles with high resolution and accuracy. This is demonstrated using an example from an international intercomparison experiment. In aerosol research a major problem occurred due to the lack of systematically collected data on its vertical distribution. This problem was at least partially solved through the establishment

of a Europe-wide lidar network, EARLINET. A large data set was collected in this frame, using standardised methodology and a systematic approach to sampling strategy and archiving. The present data set is already used for statistical analysis, for more complex studies the measurements are continued.

Einleitung

Die Fernerkundung der Atmosphäre mit optischen Verfahren ist schon lange gut etabliert, viele wichtige Größen, die zur Charakterisierung der Atmosphäre erforderlich sind, können mit ihrer Hilfe bestimmt werden. Insbesondere werden viele dieser Verfahren auch von Satelliten aus eingesetzt und liefern damit Informationen für einen großen Teil der globalen Atmosphäre. Aber auch vom Boden oder Flugzeug aus werden zunehmend optische Fernerkundungsverfahren zur Untersuchung wichtiger Prozesse eingesetzt. Überwiegend werden hierbei passive Techniken verwendet, d.h., es wird entweder reflektierte Sonnenstrahlung oder die thermische Eigenemission der atmosphärischen Bestandteile zur Messung der Zustandsgrößen genutzt. Ein Nachteil dieser Verfahren ist, dass sie nur eine grobe Höhenauflösung zulassen. Damit können wichtige Größen, die eine starke vertikale Variabilität aufweisen, nur sehr ungenügend bestimmt werden. Zu diesen Größen, für die ein dringender Bedarf an verbesserten Beobachtungsmethoden besteht, gehören an erster Stelle der Wasserdampf, der aus mehreren Gründen von herausragender Bedeutung für den Ablauf des Wettergeschehens und die Entwicklung des Weltklimas ist, aber auch die Aerosole, deren Bedeutung lange unterschätzt wurde und für die nur unzureichende Daten über die globale Verteilung vorliegen.

Lidarverfahren

Eine entscheidende Verbesserung der vertikalen Auflösung optischer Messmethoden wird durch den Einsatz aktiver Verfahren erreicht, die man unter dem Sammelbegriff Lidar (für Light Detection And Ranging) zusammenfasst. Hierbei werden, in Analogie zum Radar, kurze Lichtimpulse ausgesandt und das zurückgestreute Licht wird im Empfänger analysiert. Mithilfe der Laufzeit der Impulse bis zum Streuvolumen und zurück ist eine sehr genaue Abstandsbestimmung der Streuer möglich, die das empfangene Signal erzeugen. Das zurückgestreute Licht enthält zahlreiche Informationen über die streuenden Partikel sowie über die Gase, die sich zwischen dem Sender/Empfänger und dem Streuvolumen befinden. Aus diesen Informationen können unter anderem Temperatur, Dichte und Druck der Atmosphäre, Gehalt an Wasserdampf, Ozon und zahlreichen anderen Spurengasen, und optische sowie mikrophysikalische Eigenschaften des Aerosols abgeleitet werden, und zwar alle Parameter in Abhängigkeit von der Höhe. Durch geeignete Auswahl der gesendeten und der empfangenen Wellenlängen können einzelne Informationen getrennt und ausgewertet werden. Hierfür werden je nach Anwendungszweck zahlreiche Varianten der Lidarverfahren benutzt.

Lidarverfahren nutzen zwar einfache physikalische Prinzipien und sind deshalb theoretisch nicht besonders schwierig zu charakterisieren. Für die Instrumente und Verfahren ergeben sich jedoch viele praktische Probleme, und zwar aus folgenden Gründen:

- Von der Atmosphäre wird nur ein sehr kleiner Teil des ausgesandten Lichtes zurückgestreut. Man muss daher sehr starke Laserpulse erzeugen und trotzdem extrem schwache Lichtsignale nachweisen, und dies zumindest tagsüber gegen den starken Hintergrund des Sonnenlichts.
- Das zurückgestreute Signal hängt von sehr vielen atmosphärischen Parametern ab, wie oben

aufgelistet. Zur Bestimmung einzelner Parameter müssen sehr genau abgestimmte Laser und speziell ausgelegte Empfangsoptiken verwendet werden, um die Effekte der vielen Einflussgrößen zu isolieren.

- Die Lidarsignale fallen vom Nahbereich bis in größere Höhen der Atmosphäre in wenigen Mikrosekunden über einige Größenordnungen ab; sie müssen dabei aber mit hoher Genauigkeit gemessen werden. Dies stellt sehr hohe Anforderungen an die Datenerfassungskette vom optischen Detektor bis zur Digitalisierung.

Auf vielen Gebieten waren deshalb Spezialentwicklungen erforderlich, um die Lidarverfahren so zuverlässig und präzise zu machen, wie die Messaufgaben dies erfordern. Über diese Entwicklungen soll hier jedoch nicht berichtet werden, sondern stattdessen über zwei ausgewählte Anwendungsbereiche.

Anwendungsbeispiele

Wasserdampf in der unteren Atmosphäre

Ein Hauptziel der Lidargruppe am MPI für Meteorologie ist die Charakterisierung der Wasserdampfverteilung in der unteren Atmosphäre mit hoher Genauigkeit sowie mit hoher zeitlicher und vertikaler Auflösung. Hierfür wird ein spezielles Lidarverfahren, das „differentielle Absorptions-Lidar“ (DIAL), benutzt, das die unterschiedliche Absorption des Lichtes durch Wasserdampf bei zwei ausgesuchten Wellenlängen zur Bestimmung des Wasserdampfgehaltes der Atmosphäre ausnutzt. Dies dient sowohl der Untersuchung turbulenter Transportprozesse, aber auch der Entwicklung eines operationell einsetzbaren Systems im Messnetz des Wetterdienstes. Für Letzteres kommt es insbesondere auf eine hohe Absolutgenauigkeit der Messungen an, aber auch auf eine hohe Zuverlässigkeit und geringen Wartungsaufwand. Dafür besteht noch Entwicklungsbedarf, der im Wesentlichen die Systemtechnik betrifft. Das wissenschaftliche Hauptziel, die hohe Genauigkeit, wurde bereits in zahlreichen Vergleichsmessungen nachgewiesen. Hierfür zeigt **Abbildung 1** ein Beispiel aus dem Feldexperiment AFWEX200, das im Rahmen des „Atmospheric Radiation Measurement Program“ des Department of Energy der USA in Zusammenarbeit mit der NASA, der NOAA, einigen amerikanischen Universitätsinstituten und dem MPI für Meteorologie im November/Dezember 2000 in Oklahoma durchgeführt wurde. Das DIAL des MPI wurde hier eingesetzt, weil es zuverlässige Absolutwerte des Wasserdampfgehaltes in der unteren Atmosphäre liefert. **Abbildung 1** zeigt den Vergleich der Profilmessungen für einen etwa 10-minütigen Abschnitt von vier unterschiedlichen Instrumenten: einer speziellen Radiosonde, wie sie in weniger genauer Ausführung im weltweiten Messnetz der Wetterdienste verwendet wird, einem bodengebundenen Raman-Lidar (CARL), einem Flugzeug-getragenen DIAL der NASA (LASE), und dem bodengebundenen DIAL des MPI. Man erkennt deutlich die starke Höhenabhängigkeit der Luftfeuchte, über einer Schicht relativ hoher Feuchte in Bodennähe liegt zunächst eine sehr trockene und dann ab etwa 2000 m Höhe wieder eine sehr feuchte Schicht. Die Übereinstimmung der vier Messungen ist sehr gut, allerdings sind die Höhenauflösungen durchaus unterschiedlich, wodurch der Verlauf des Profils an den Schichtgrenzen verschieden wiedergegeben wird. Die geschätzten Messfehler sind ebenfalls aufgetragen, und zwar als Standardabweichung σ im rechten Teil des Bildes. Die geschätzten Fehler sind für einen großen Teil des Höhenbereiches gering, für größere Höhen wird jedoch der relative Fehler insbesondere für das bodengebundene DIAL schon erheblich, da die Lidarsignale durch die feuchten Schichten in der unteren Atmosphäre stark absorbiert werden. Für die Flugzeugmessungen, die von oben ausgeführt werden, ist dies kein Problem. Beim Vergleich mit dem

Raman-Lidar ist anzumerken, dass diese Messungen nachts durchgeführt wurden, am Tage ist die Messgenauigkeit des Raman-Lidars wegen des störenden Einflusses des Tageslichtes wesentlich geringer.

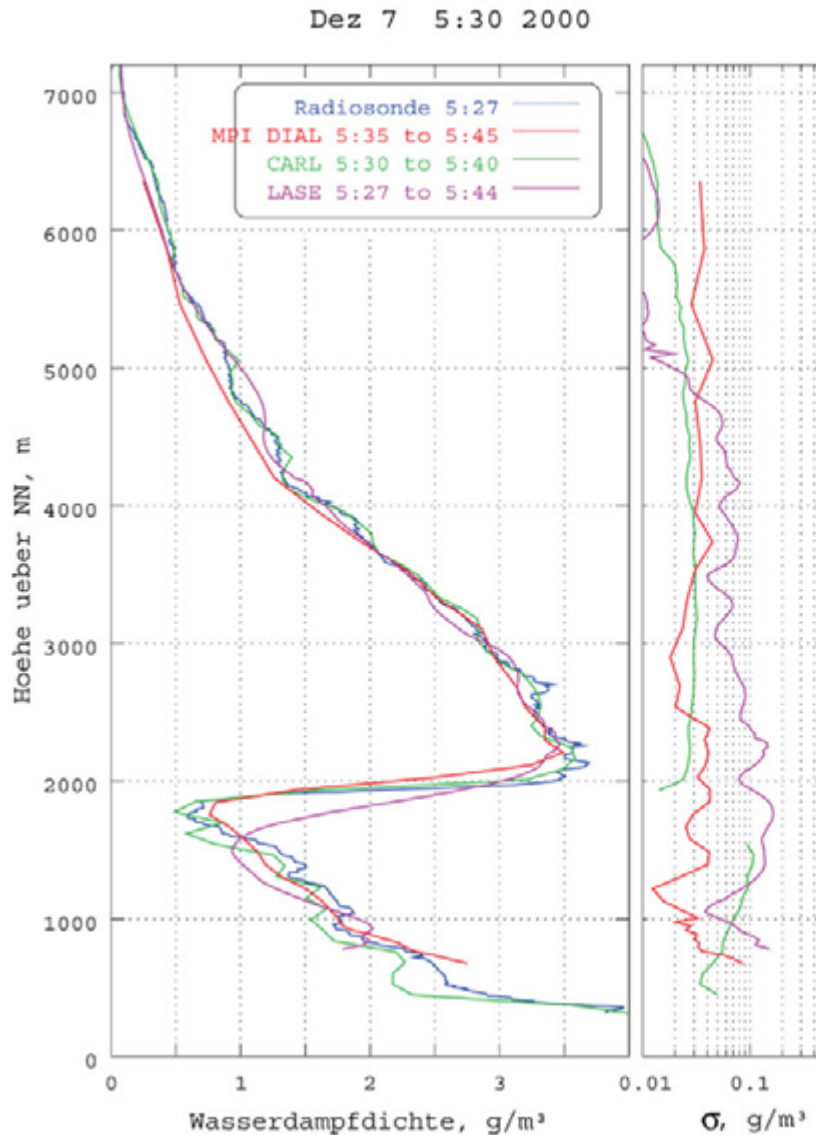


Abb. 1: Vergleich von Radiosonde, bodengebundenem DIAL (MPI DIAL), Raman-Lidar (CARL), und Flugzeug-DIAL (LASE) für Profilmessungen der Wasserdampfdichte. Geschätzte statistische Messfehler sind ebenfalls angegeben (rechtes Bild, 1σ -Standardabweichung).

Abbildung 2 zeigt einen wichtigen Vorteil der Lidarmessungen gegenüber den direkten Messverfahren, z.B. den Radiosonden: sie können kontinuierlich durchgeführt werden und damit die zeitliche Entwicklung genau verfolgen. Wenn man berücksichtigt, dass an den meisten Beobachtungsstationen nur zwei Radiosondenaufstiege pro Tag durchgeführt werden, ist die Bedeutung der zusätzlichen Information offensichtlich, die durch den Einsatz des Lidars erreicht werden kann. Die hier gezeigte Wasserdampfverteilung, bei der über einer feuchten Schicht in

Bodennähe zunächst eine sehr trockene Schicht folgt und darauf wiederum eine sehr feuchte, wird erstaunlich häufig angetroffen, auch in anderen Gegenden als Oklahoma. Sie ist in Messungen von Satelliten nur sehr schwer zu erkennen, stattdessen wird eine mittlere Feuchte angegeben.

Kontinuierliche Beobachtungen mit Lidar können solche Fehler vermeiden, die eine erhebliche Auswirkung z.B. auf die Vorhersage von Bewölkung und Niederschlag haben.

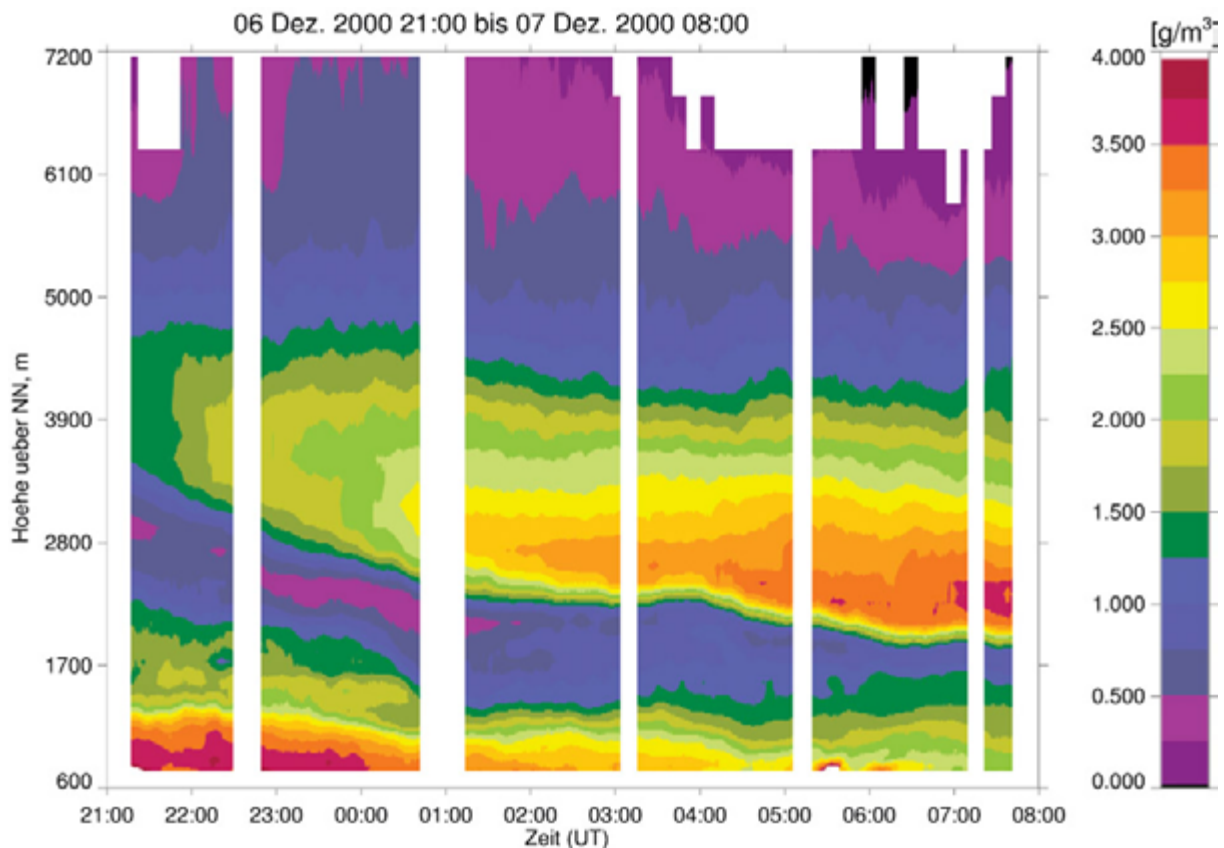


Abb. 2: Zeit-Höhenschnitt der Wasserdampfverteilung gemessen mit dem MPI-DIAL nahe Lamont, Oklahoma, 7. Dezember 2000.

Troposphärisches Aerosol

Ein weiterer Schwerpunkt der Lidargruppe ist die systematische Bestimmung der vertikalen Verteilung von Aerosolteilchen, den Schwebeteilchen in der Atmosphäre mit Abmessungen von 0,01 bis höchstens 10 Mikrometer. Hier bestand besonderer Bedarf für systematische Messungen, da solche vor Beginn der regelmäßigen Lidarmessungen zunächst an 5 Stationen im Rahmen des deutschen Lidar-Messnetzes, anschließend dann an 21 Stationen im Rahmen des von uns ins Leben gerufenen European Aerosol Research Lidar Network (EARLINET) weltweit nirgends vorlagen. Erst durch die Einführung einheitlicher Mess- und Auswerteverfahren, strikte Qualitätskontrolle, und systematische Planung der Messungen konnte ein umfangreicher Datensatz aufgebaut werden, der eine einheitliche Charakterisierung der Vertikalverteilung des Aerosols und dessen optischen Eigenschaften an 21 Stationen in 13 europäischen Ländern erlaubt. Ohne auf die Einzelheiten des Messverfahrens einzugehen soll hier nur erwähnt werden, dass an fast allen Stationen Messungen der Raman-Streuung

durch atmosphärischen Stickstoff neu eingeführt wurden, die erst eine eindeutige Bestimmung der Extinktion durch Aerosol ermöglichen.

Abbildung 3 zeigt als ein Beispiel die Verteilung der optischen Dicke des Aerosols in der atmosphärischen Grenzschicht über Hamburg. Die Grenzschicht ist die unterste Schicht der Atmosphäre, in der innerhalb kurzer Zeit, etwa einer Stunde, ein Einfluss der Erdoberfläche und damit auch der menschlichen Aktivitäten merklich ist. Diese Schicht, deren Höhe übrigens bei den Lidarmessungen auch bestimmt wird, ist über Hamburg etwa 1 bis 2 km hoch. Die Messwerte der optischen Dicke aus inzwischen fünf Jahren systematischer Beobachtung zeigen eine sehr breite Streuung, die wesentlich größer ist als die jahreszeitlichen Schwankungen, die bei genügender Mittelung jedoch auch deutlich zu erkennen sind.

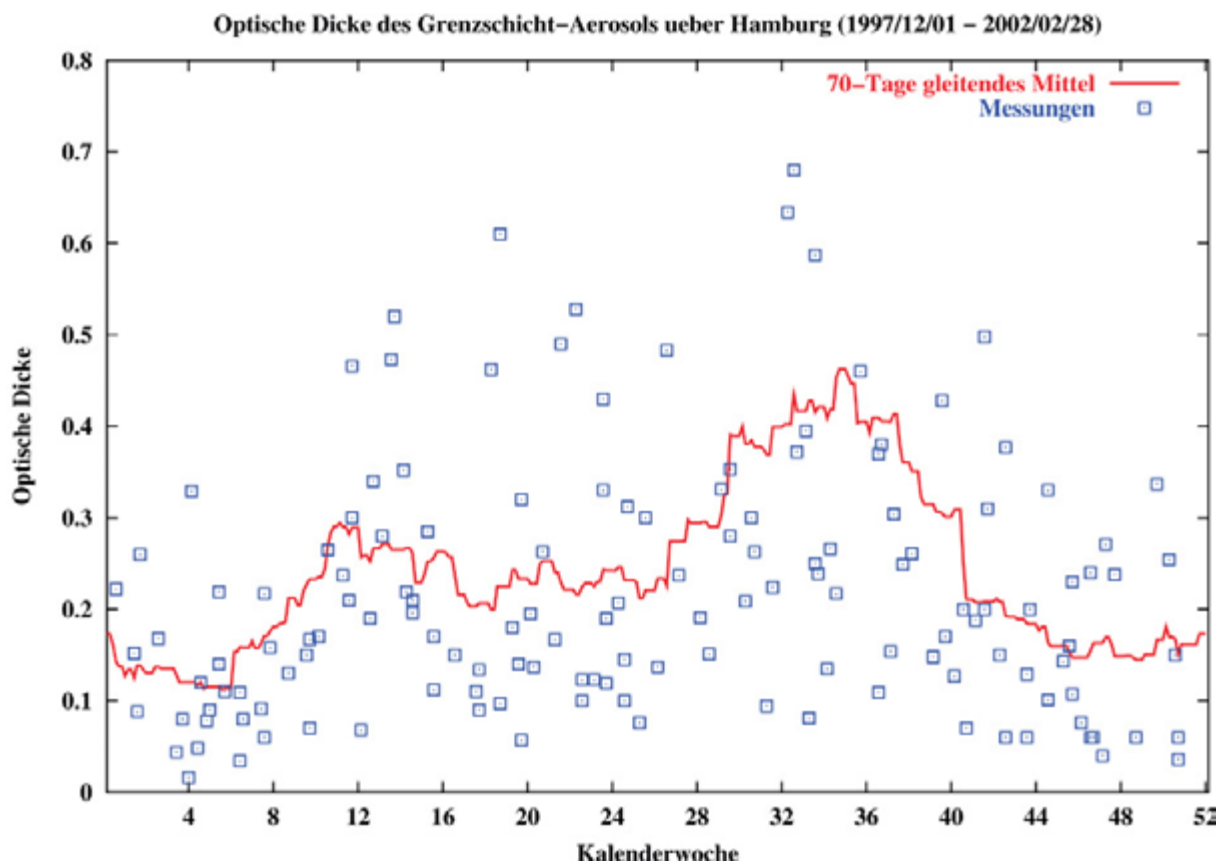


Abb. 3: Lidarmessungen der optischen Dicke des Grenzschichtaerosols über Hamburg. Einzelmessungen aus mehr als 4 Jahren und gleitender Mittelwert zur Verdeutlichung der Abhängigkeit von der Jahreszeit.

Die große Variabilität der Messungen wird gut beschrieben durch eine logarithmische Normalverteilung, sodass wenigstens statistisch gesicherte Aussagen über die Wahrscheinlichkeit des Auftretens bestimmter optischer Dicken gemacht werden können. Alle Versuche, eine individuelle Vorhersage auf Grund von Korrelationen mit anderen meteorologischen Parametern zu machen, waren jedoch erfolglos. Dies lässt den Schluss zu, dass eine Vorhersage von Aerosoleigenschaften nur gelingen wird, wenn die Prozesse, die die Aerosolverteilung bestimmen, ausreichend bekannt und

vorhersagbar sind. Dies erweist sich als sehr schwierig, da die Quellen von Aerosolen sowohl sehr lokal (Schornstein, Autoauspuff) als auch weit verteilt (Partikelbildung aus Spurengasen) sein können, weil die Teilchen auch in dünnen Schichten in verschiedenen Höhen über weite Entfernungen transportiert werden, und weil die Prozesse, die ein Auswaschen oder andere Arten der Deposition bewirken, mit den selbst sehr schwer vorherzusagenden Prozessen der Wolken- und Niederschlagsbildung verbunden sind. Bei der Untersuchung dieser Vorgänge kann die systematische Beobachtung mit Lidar-Netzwerken eine wichtige Rolle spielen, da nur so die erforderliche Information über die Höhe der beobachteten Aerosolschichten erlangt werden kann. Nur wenn die Höhe von Aerosolschichten genau bekannt ist, können diese Schichten bis zu ihrem Ursprung zurückverfolgt werden und damit die Prozesse der Erzeugung, Umwandlung und Deposition von Aerosolen analysiert werden. Dies ist deshalb besonders wichtig, weil der Einfluss der Aerosole auf den Strahlungshaushalt der Atmosphäre und damit auf das lokale und globale Klima zu den bisher am wenigsten bekannten Faktoren gehört, die das zukünftige Klima bestimmen.