

Einleitung

Zwei Gründe sind zu nennen, warum man die Ausbreitung hochintensiver kurzer Laserpulse in Luft erforscht. Auf der einen Seite steht der Bereich, der im Titel dieser Arbeit unter dem Begriff „Phänomene“ zusammengefasst ist. Gemeint sind damit die faszinierenden nichtklassischen Effekte bei der Wechselwirkung dieser mikrometerlangen „Lichtgeschosse“ mit Luft. Sie haben in den vergangenen zehn Jahren das Feld der nichtlinearen Optik, das wie der Laser selbst etwa vierzig Jahre alt ist, in vielfacher Weise bereichert. Phänomene, die bis dahin nur von Kristallen, Gläsern und Flüssigkeiten bekannt waren, traten in teilweise veränderter Form nun auch in Luft auf und neue kamen hinzu. Die Aufhebung der Gesetze der klassischen Optik mit dem bloßen Auge zu beobachten ist am beeindruckendsten, wenn sie in „nichts als reiner Luft“ geschieht. Die Vielfalt und Komplexität der nichtlinearen Optik im Allgemeinen und dieses Teilgebiets im Besonderen bieten reichlich Möglichkeiten Neues zu entdecken. Umso unübersichtlicher ist dafür das Geflecht der Veröffentlichungen zu diesem Themenbereich und Anhaltspunkte für tragfähige theoretische Deutungen sind oft noch schwer zu finden.

Auf der anderen Seite besteht ein ständig wachsendes Interesse daran, die physikalischen und chemischen Prozesse in der Atmosphäre und deren Bedeutung für das Leben auf der Erde besser zu verstehen. Begriffe wie Luftverschmutzung, Zerstörung der Ozonschicht und Klimawandel sind schon lange im öffentlichen Bewusstsein. Der Einsatz von Lasern in der optischen Fernerkundung hat in den vergangenen Jahrzehnten einen wichtigen Beitrag zu ihrem Verständnis geleistet. Trotzdem existieren immer noch viele offene Fragen. Die Möglichkeiten der (klassischen) Methoden der Laserfernerkundung sind inzwischen aber teilweise ausgereizt. Daher lohnt sich die Suche nach neuen Methoden. Der Begriff „Anwendungen“ im Titel steht also für die Fernerkundung von Substanzen in der Atmosphäre. Er ist aber nicht streng darauf beschränkt, wie der Abschnitt 2.3 über das Auslösen und Lenken von Blitzentladungen zeigt.

In der Arbeitsgruppe von Prof. Ludger Wöste an der Freien Universität Berlin sind seit dem Ende der achtziger Jahre viele Arbeiten auf dem Gebiet der Laserfernerkundung der Atmosphäre sowie Laborexperimente an isolierten Luftpartikeln durchgeführt worden. Prof. Roland Sauerbrey und seine Mitarbeiter am Institut für Optik und Quantenelektronik der Friedrich-Schiller-Universität Jena haben langjährige Erfahrung mit der Erzeugung hoch-

intensiver Laserpulse und deren Wechselwirkung mit Materie. Die gemeinsame Initiative von Prof. Wöste und Prof. Sauerbrey die beiden Forschungsgebiete zusammenzuführen geht auf die Beobachtung zurück, dass aus den Pulsen des in Jena entwickelten Terawattlasers bei ausreichend langer Ausbreitung in Luft ein weißer Strahl entsteht. Die Ergebnisse der ersten Testversuche, bei denen der Laserstrahl in die Atmosphäre gesandt und die Rückstreuung gemessen wurde [Wöste et al., 1997; Rairoux et al., 2000], waren so vielversprechend, dass Mitte 1999 ein Projekt mit Namen „Teramobile“ ins Leben gerufen wurde, in dem das weltweit erste mobile Terawatt-Laserlabor gebaut werden sollte.

Die vorliegende Arbeit behandelt den Aufbau dieses Projekts, die Messkampagnen und Experimente der ersten vier Projektjahre, die daraus gewonnenen physikalischen Erkenntnisse und die Entwicklung verschiedener neuer Anwendungen. Die Schwierigkeit bestand darin die vielfältigen Experimente und physikalischen Aspekte in einem schlüssigen Zusammenhang darzustellen. An dieser Stelle folgen daher einige Erläuterungen zur Gliederung der Arbeit. Sie beginnt mit einer Beschreibung der Konzeption und der Eigenschaften des mobilen Labors „Teramobile“. Da die durchgeführten Experimente in ständiger Verflechtung sowohl die nichtlineare Optik (Phänomene) als auch die Untersuchung der Atmosphäre (Anwendungen) betreffen, sind sie sämtlich in Kapitel 2 zusammengefasst, wobei jeweils die Motivation, die Durchführung und die direkten Ergebnisse dargestellt sind. In den folgenden Kapiteln finden sich dann die Auswertungen und Interpretationen der experimentellen Ergebnisse geordnet nach Einzelaspekten, die in die Bereiche nichtlineare Optik (Kapitel 3) und Untersuchung der Atmosphäre (Kapitel 4) aufgeteilt sind. Eine große Zahl von Querverweisen verbindet die einzelnen Elemente miteinander.

Das Kapitel zur nichtlinearen Optik ist das deutlich umfangreichere. Dies erklärt sich nicht nur aus dem grundlegenden Interesse an den Phänomenen, sondern vor allem daraus, dass deren Erforschung eine notwendige Voraussetzung für die Entwicklung der Anwendungen ist. Das heißt auch, dass bei der Untersuchung der Phänomene immer die Bedeutung für die Anwendungen im Vordergrund steht. Viele notwendige Erkenntnisse können erst mit dem Teramobile gewonnen werden, da die entsprechenden Effekte sich weder im Labormaßstab untersuchen noch – bis heute – theoretisch berechnen lassen. So hat das Teramobile gerade mit dieser neuen Möglichkeit, an beliebigen Orten Langstreckenexperimente durchzuführen, viel Aufmerksamkeit bei den Forschern gewonnen, die sich mit der nichtlinearen Ausbreitung von hochintensiven Pulsen beschäftigen.

In Kapitel 2 sind die experimentellen Details ausführlich beschrieben. Der Leser, der an diesen nicht direkt interessiert ist, kann sich anhand der Überschriften und einleitenden Textpassagen der Unterkapitel sowie der Abbildungen einen Überblick über die Motiva-

tion und Ergebnisse der Versuche verschaffen und in Kapitel 3 mit der intensiveren Lektüre beginnen. Dort und in Kapitel 4 finden sich etliche Querverweise auf Kapitel 2, die ein selektives Nachlesen ermöglichen. Eine Ausnahme bildet das Thema Blitzendladungen, das in Kapitel 2 (Abschnitt 2.3) mit der kompletten Auswertung und Diskussion der Ergebnisse geschlossen dargestellt ist.

Die ausführliche Beschreibung der Experimente dient nicht nur der späteren Nachvollziehbarkeit und dem Erhalt der gewonnenen Erfahrungen – vor allem für zukünftige Mitarbeiter des Projekts –, sondern ist auch Ausdruck der Erfahrung, dass gerade in dem hier behandelten Forschungsgebiet oft Details, die zunächst kaum beachtet werden, später von Interesse sein können. So enthält Kapitel 2 auch phänomenologische Teilergebnisse, die nicht in die thematisch geordnete Auswertung und Interpretation (Kapitel 3 und 4) eingegangen sind.

Hinsichtlich der Entwicklung neuer Messmethoden stellt diese Arbeit eine Zwischenbilanz dar. Die vielfältigen Aktivitäten des Teramobile-Projekts laufen unvermindert weiter. Im Ausblick wird kurz auf die neuesten Ergebnisse eingegangen.

Abschließend seien zwei Begriffe eingeführt, die in dieser Arbeit von Beginn an vielfach verwendet, aber erst weiter hinten ausführlich erklärt werden: Filament und Lidar. Sie symbolisieren gewissermaßen die beiden Bereiche Phänomene und Anwendungen.

Mit **Filament** ist eine Zone gemeint, in der ein Laserpuls (oder ein Teil von diesem) aufgrund einer dynamischen Balance aus Selbstfokussierung (optischer Kerr-Linseneffekt) und defokussierenden Mechanismen mit einem konstanten Durchmesser in der Größenordnung von $100\ \mu\text{m}$ und einer Intensität von 10^{13} bis $10^{14}\ \text{W}/\text{cm}^2$ propagiert. Da diese Intensität gerade die Ionisationsgrenze (multiphotonisch) übersteigt, ist die Filamentierung eng mit der Erzeugung von Plasma verbunden. Das Plasma verhindert durch seine defokussierende Wirkung das Kollabieren des Strahls. Filamente erreichen in Luft Längen von vielen Metern. In ihnen entsteht durch starke spektrale Verbreiterung weißes Licht.

Lidar (*Light Detection and Ranging*) ist der Oberbegriff für mehrere der wichtigsten Methoden der optischen Fernerkundung, denen gemeinsam ist, dass man Laserpulse in die Atmosphäre sendet und ihre elastische oder inelastische Rückstreuung aus der Luft mit Teleskopen empfängt. Die Detektion ist an eine schnelle Ausleseelektronik gekoppelt, so dass man das empfangene Licht, welches Informationen über die Atmosphäre enthält, über seine Laufzeit einer Entfernung zuordnen kann.

