

Aufbau und Test von
Mehrfachstreudetektionskanälen zur Messung
der Wolkentröpfchengröße mit einem
Ramanlidar

Diplomarbeit

im Studiengang Physik

Friedrich-Schiller-Universität Jena
Physikalisch-Astronomische Fakultät



eingereicht von
Jörg Schmidt
geboren am 16.08.1982
in Dresden

Gutachter:

1. *Prof. Dr. phil. nat. habil. Herbert Stafast*
Institut für Photonische Technologien e.V. und
Friedrich-Schiller-Universität Jena
2. *Dr. Ulla Wandinger*
Leibniz-Institut für Troposphärenforschung Leipzig e.V.

Tag der Verleihung des Diploms:

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	2
2.1	Lidarprinzip	2
2.2	Lidargleichung	3
2.3	Feldblende und Gesichtsfeld des Teleskops	4
2.4	Mehrfachstreuung in der Lidartechnik	5
2.4.1	Lidargleichung bei Mehrfachstreuung	6
2.4.2	Einflüsse auf den Mehrfachstreuanteil eines Lidarsignals	7
2.4.3	Bestimmung des Extinktionskoeffizienten und der Tröpfchengröße in Wolken	8
3	Ramanlidar MARTHA: Aufbau und vorgenommene Umbauarbeiten	10
3.1	Allgemeiner Aufbau des Ramanlidars MARTHA	10
3.2	Teleskop	12
3.3	Gesichtsfeld, Feldblende und Überlappungsfunktion	13
3.3.1	Verwendete Gesichtsfelder	14
3.3.2	Spiegelblende	15
3.3.3	Rückstreuung aus endlichen Höhen und Überlappungsfunktion . . .	16
3.4	Strahlseparationseinheit	19
3.4.1	Einfachstreukanäle	19
3.4.2	Mehrfachstreukanäle	22
3.5	Optische Abbildung im Empfänger	26
3.5.1	Problemstellung und Motivation der neuen optischen Abbildung . .	26
3.5.2	Optische Abbildung im Ramanlidar MARTHA	28
3.5.3	Realisierung der entworfenen optischen Abbildung	31
3.5.4	Simulation und Überprüfung der Nachweiskanäle	32
4	Qualitätstests	34
4.1	Telecover-Test	34
4.1.1	Durchführung	34
4.1.2	Vergleich der Test-Kurven der Nachweiskanäle	36
4.1.3	Vergleich der Test-Kurven der Sektoren des Hauptspiegels	40
4.2	Test des Einflusses von Schrägstellung und endlicher Dicke der Spiegelblende	45
4.3	Akzeptanzwinkel der Interferenzfilter und des dichroitischen Spiegels in den Mehrfachstreukanälen	48

5 Messungen	51
5.1 Messbeispiele	51
5.2 Kalibrierung der Lidarsignale	54
5.3 Ergebnisse	54
6 Diskussion	56
6.1 Empfängeraufbau des Ramanlidars MARTHA	56
6.2 Messungen	58
6.3 Verwendetes Verfahren zur Bestimmung von Tröpfchengrößen in Wolken .	61
6.4 Ausblick: Untersuchung des indirekten Aerosol-Effekts	61
7 Zusammenfassung	63
Literatur	65

1 Einleitung

Die Thematik der globalen Klimaveränderung gewinnt weiter an Bedeutung in der öffentlichen Diskussion. Nicht zuletzt hat die Klimaforschung zu der wachsenden Aufmerksamkeit beigetragen. Heute können mit großer Sicherheit weitreichende und schwerwiegende Auswirkungen der Klimaveränderung wissenschaftlich fundiert vorausgesagt werden. So wird in Regionen kleiner geografischer Breite, wo teilweise schon heute Hungersnöte und Unterernährung herrschen, ein Rückgang der Nahrungsmittelproduktion prognostiziert. Bei einer Erhöhung der mittleren Erdtemperatur um mehr als 3 K wird die weltweite Nahrungsmittelproduktion zurückgehen. Mit hoher Sicherheit werden einige eher trockene Regionen, wie z.B. das südliche Europa, mit erhöhter Wasserknappheit konfrontiert werden [1]. Es ist nötig, die Vorhersagen der Klimaveränderung weiter zu präzisieren, damit verantwortungsbewusst mit dieser Problematik umgegangen werden kann.

Der Einfluss des Spurengases CO_2 , das den größten Beitrag zum anthropogenen Treibhauseffekt liefert, ist bereits sehr gut erforscht. Jedoch erschweren zahlreiche Wechselwirkungen und Rückkopplungen im Klimasystem die Erstellung präziser Prognosen zur Klimaveränderung. Eine dieser Wechselwirkungen ist der indirekte Aerosol-Effekt. Dieser beschreibt den Einfluss von Aerosolen auf Wolken und die damit verbundene Änderung der globalen Strahlungsbilanz.

Am Leibniz-Institut für Troposphärenforschung (IfT) werden physikalische und chemische Eigenschaften von Aerosolen sowie deren Einfluss auf die Wolkenbildung untersucht. Neben Laborexperimenten liefern Feldmessungen dazu wichtige Erkenntnisse. Am IfT werden verschiedene Lidar-Systeme (**L**ight **D**etection and **R**anging) betrieben, um atmosphärische Eigenschaften zu bestimmen. Eines davon ist das stationäre 3-Wellenlängen-Ramanlidar MARTHA (**M**ultiwavelength **A**tmospheric **R**aman Lidar for **T**emperature, **H**umidity and **A**erosol Profiling). Damit ist u.a. die Ermittlung von zeitlich und räumlich hochaufgelösten Profilen von Aerosoleigenschaften möglich. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde das Lidar um zwei Detektionskanäle erweitert, damit Mehrfachstreuungsprozesse in Wolken untersucht werden können. Dadurch kann ein von Malinka und Zege [2, 3] vorgeschlagenes Verfahren zur Bestimmung des Extinktionskoeffizienten und der Tröpfchengröße in Wasserwolken angewendet werden. Die Kenntnis der Tröpfchengröße und der Aerosoleigenschaften sind entscheidend für die Untersuchung des indirekten Aerosol-Effekts.

Die Arbeit gliedert sich in sieben Kapitel. Nach der Einleitung werden die für das Verständnis der Arbeit notwendigen Grundlagen erläutert. Kapitel 3 beschreibt zunächst den Aufbau des Ramanlidars MARTHA. Anschließend wird auf die umfangreichen Umbauarbeiten der Empfängerseite des Lidars eingegangen, die für den Aufbau der Detektionskanäle für mehrfach gestreutes Licht notwendig waren. Unter anderem wurde ein neues Empfangsteleskop eingebaut und das Prinzip des Strahlengangs in den Detektionskanälen verändert. Dadurch konnte die Qualität des Empfängeraufbaus deutlich erhöht werden, was in Kapitel 4 gezeigt wird. Dort werden verschiedene Qualitätstests vorgestellt, mit denen das Ramanlidar MARTHA überprüft wurde. Nach den Umbauarbeiten wurden Mehrfachstreu-Messungen durchgeführt. Diese werden in Kapitel 5 behandelt. Die durchgeführten Umbauarbeiten, die gewonnenen Messergebnisse und die Methode zur Bestimmung der Tröpfchengröße werden in Kapitel 6 diskutiert. Ein Ausblick rundet die Diskussion ab. Abschließend werden die wesentlichen Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden zunächst die Grundlagen der Lidartechnik vorgestellt. Dazu gibt Abschnitt 2.1 eine Einführung in die Lidartechnik. Neben der Erklärung der grundsätzlichen Funktionsweise eines Lidars wird dort auf verschiedene Streumechanismen eingegangen sowie erläutert, welche Informationen mit Hilfe eines Lidars gewonnen werden können. Anhand der Lidargleichung wird anschließend ein Zusammenhang zwischen gemessenen Größen und Parametern der Atmosphäre hergestellt. In Abschnitt 2.3 wird die Thematik von Feldblende und Gesichtsfeld erläutert, bevor in Abschnitt 2.4 ausführlich auf Mehrfachstreuung im Rahmen der Lidartechnik eingegangen wird.

2.1 Lidarprinzip

Ein Lidar ist ein optisches Fernmessinstrument, mit dem zeitlich und räumlich hochaufgelöste Profile atmosphärischer Parameter gewonnen werden können. Das Verfahren beruht auf der zeitaufgelösten Messung von zurückgestreutem Licht¹ eines gepulsten Lasers. Dabei entlässt eine Sendeoptik einen kurzen, hochenergetischen Lichtpuls in die Atmosphäre. Dieses Licht wird in der Atmosphäre gestreut, u.a. auch zurück in Richtung des Lidars. Die Streuung kann an Wolkentropfen, Eiskristallen, Partikeln oder Molekülen der Luft erfolgen.

Der Teil des Lichts, der zum Lidar zurückgestreut wird, wird von einem Teleskop gesammelt, nach Wellenlängen getrennt und mit Hilfe von Photomultipliern (auch PMT, für engl. **ph**otom**u**ltiplier **t**ube) detektiert. Durch das zeitaufgelöste Erfassen der Signale ist es möglich, aus der Laufzeit t des Lichtpulses mit Hilfe der Lichtgeschwindigkeit c die Entfernung z des Streuorts zu bestimmen:

$$z = \frac{ct}{2}. \quad (1)$$

Streuprozesse können in elastische und inelastische Vorgänge unterschieden werden. Bei der elastischen Streuung bleibt die Wellenlänge des Lichts erhalten. Ist dabei das streuende Teilchen deutlich kleiner als die Wellenlänge des gestreuten Photons spricht man von Rayleighstreuung. Dies ist zum Beispiel bei der Streuung von Licht an Molekülen der Fall.

Bei inelastischen Prozessen erfolgt eine Verschiebung der Wellenlänge. Die im Rahmen der Lidartechnik genutzte Art der inelastischen Streuung ist die Ramanstreuung. Dabei finden Rotations- oder Vibrations-Rotations-Übergänge im streuenden Molekül statt. Die Energieänderungen bei diesen Übergängen entsprechen der Wellenlängenverschiebung des gestreuten Photons. Im Fall von Vibrations-Rotations-Übergängen und bei den Temperaturen und Drücken, die in der Erdatmosphäre vorherrschen, haben die rotverschobenen Linien (Stokes-Linien) eine deutlich stärkere Intensität als die entsprechenden blauverschobenen Linien (Anti-Stokes-Linien). Deshalb werden bei der Detektion von Licht, das bei Vibrations-Rotations-Übergängen inelastisch gestreut wird, meist Stokes-Linien benutzt. Die Frequenzverschiebung bei Vibrations-Rotations-Übergängen ist deutlich größer als bei reinen Rotationsübergängen.

Durch die Detektion von elastisch gestreutem Licht kann das Höhenprofil des Rückstreuungskoeffizienten $\beta(z)$ bestimmt werden [4]. Dieser beschreibt, wie viel von dem ausgesandten

¹Die Bezeichnung „Licht“ bezieht sich hier auf elektromagnetische Strahlung im Wellenlängenbereich von infraroter, sichtbarer und ultravioletter Strahlung.

Laserlicht in der Höhe z zurückgestreut wird. Aus der Polarisierung des zurückgestreuten Lichts können Rückschlüsse auf die streuenden Partikel gezogen werden. Zum einen kann damit untersucht werden, ob Wolken aus Wasser oder Eis bestehen oder Mischphasenwolken sind [5]. Zum anderen können verschiedene Aerosoltypen, wie z.B. Wüstenstaub und Waldbrand-Aerosol voneinander unterschieden werden [6]. Es ist möglich, das Höhenprofil des Extinktionskoeffizienten $\alpha(z)$ aus Ramansignalen zu ermitteln [7, 8]. Dabei wird Licht detektiert, das an Stickstoff- oder Sauerstoffmolekülen inelastisch gestreut wird. Der Extinktionskoeffizient beschreibt die Schwächung des ausgesandten Laserlichts und des zurückgestreuten Lichts beim Durchlaufen der Atmosphäre aufgrund von Streuung und Absorption. Durch die Nutzung von Rotations-Übergängen in Stickstoff- oder Sauerstoffmolekülen können Temperaturprofile bestimmt werden [9]. Weiterhin kann ein Profil des Wasserdampfgehalts ermittelt werden. Dafür wird Licht detektiert, das an Wassermolekülen inelastisch gestreut wurde. Zusätzlich ist dabei das Ramansignal eines Referenzgases – üblicherweise Stickstoff – notwendig [10]. Werden die Profile des Wasserdampfgehalts und der Temperatur mit einem Lidar bestimmt, so ist es möglich den Höhengang der relativen Feuchte zu bestimmen [11].

2.2 Lidargleichung

Die Lidargleichung stellt einen Zusammenhang zwischen der Leistung P des detektierten Signals und atmosphärischen Parametern wie dem Extinktionskoeffizienten $\alpha(z)$ und dem Rückstreuungskoeffizienten $\beta(z)$ her. Die Gleichung lautet im Fall elastischer Streuung von Licht eines Laserpulses mit der Wellenlänge λ_0 und der Leistung P_0 :

$$P(z, \lambda_0) = P_0 \frac{K(\lambda_0)O(z)}{z^2} \beta(z, \lambda_0) \exp[-2 \int_0^z \alpha(\zeta, \lambda_0) d\zeta]. \quad (2)$$

Wird Licht der Wellenlänge λ_0 inelastisch gestreut, so dass Licht mit λ_R detektiert wird, lautet die Lidargleichung

$$P(z, \lambda_R) = P_0 \frac{K(\lambda_R)O(z)}{z^2} \beta_R(z, \lambda_0) \exp \left\{ - \int_0^z [\alpha(\zeta, \lambda_0) + \alpha(\zeta, \lambda_R)] d\zeta \right\}. \quad (3)$$

In die Systemfunktion

$$K(\lambda_i) = \frac{c\tau}{2} A \eta(\lambda_i), \quad i = 0, R \quad (4)$$

gehen die Länge des Laserpulses τ , die Fläche des Empfangsteleskops A und die Effizienz des Empfängers $\eta(\lambda_i)$ ein. $O(z)$ beschreibt die Überlappung der Querschnitte von Laserstrahl und Empfängergesichtsfeld in der Höhe z und wird verkürzt Überlappungsfunktion oder auch geometrischer Faktor genannt. Die Funktion gibt für jede Höhe z den Anteil der vom Laser beleuchteten Fläche an, der im Gesichtsfeld des Empfängerteleskops liegt. Auf den Begriff des Gesichtsfelds wird in Abschnitt 2.3 weiter eingegangen. Die Überlappungsfunktion ist in kleinen Höhen Null und nimmt mit der Höhe bis auf 1 zu. Ab der Höhe, in der die Überlappungsfunktion ihr Maximum erreicht hat, können Daten standardmäßig ausgewertet werden. Unterhalb sind Korrekturen notwendig und es ist mit systematischen Fehlern zu rechnen.

Der Faktor $1/z^2$ beschreibt die Abnahme der Intensität des rückgestreuten Lichts aufgrund der Geometrie: Die in einen Raumwinkel ausgesandte Strahlung verteilt sich mit zunehmender Entfernung auf eine immer größere Fläche. Damit nimmt der Anteil des

rückgestreuten Lichts, der auf das Teleskop trifft, quadratisch mit der Höhe ab. Diese große Entfernungsabhängigkeit bewirkt, dass der Dynamikbereich der Rückstreusignale mehrere Größenordnungen umfasst.

2.3 Feldblende und Gesichtsfeld des Teleskops

Als Gesichtsfeld des Teleskops wird der Raumwinkelbereich in der Atmosphäre bezeichnet, aus welchem Licht durch das Teleskop in die Empfängeroptik gelangen kann. Die Größe des Gesichtsfelds wird über eine Feldblende festgelegt, die von außerhalb des Gesichtsfelds kommende Strahlen abschattet. Die Wirkungsweise der Feldblende ist in Abb. 1 verdeutlicht. Dort steht die Blende im Fokus des Teleskops. In dieser Darstellung ist anstatt des Teleskops eine Ersatzoptik abgebildet. Dabei wird das Teleskop als eine einzelne Linse behandelt, deren Brennweite gleich der effektiven Brennweite F des Teleskops ist. Der Durchmesser der Linse stimmt mit dem Durchmesser des Hauptspiegels überein, der für Strahlen aus großen Entfernungen der Apertur des Teleskops entspricht.

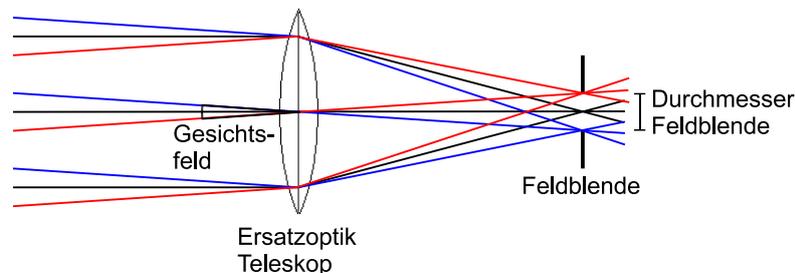


Abbildung 1: Definition eines Gesichtsfelds durch eine Feldblende im Fokus des Empfangsteleskops. Anstelle des Teleskops ist eine Sammellinse als Ersatzoptik dargestellt.

In Abb. 1 ist gut zu erkennen, dass sich mit steigendem Blendendurchmesser das Gesichtsfeld des Teleskops vergrößert. Steht die Blende mit Durchmesser D_{Bl} im Fokus des Teleskops mit Brennweite F , ergibt sich dessen Gesichtsfeld FOV (von engl. **field of view**) zu:

$$FOV = \frac{D_{Bl}}{F}. \quad (5)$$

Da typische Gesichtsfelder in der Lidartechnik in der Größenordnung von 1 mrad liegen, kann in dieser Gleichung in guter Näherung der eigentlich nötige Tangens des Gesichtsfelds durch sein Argument ersetzt werden. Diese Betrachtungen gelten streng jedoch nur für Strahlen, die im Fokus des Teleskops gebündelt werden, also für Strahlen von unendlich entfernten Objekten. In Abschnitt 3.3.3 werden diese Überlegungen für endlich entfernte Objekte (atmosphärische Rückstreuhoen) verallgemeinert.

Ein großes Gesichtsfeld hat den Vorteil, dass die Überlappungsfunktion bereits in niedrigen Höhen ihr Maximum annimmt. Der Vorteil eines kleinen Gesichtsfeld ist hingegen der kleinere Signalhintergrund am Tag durch gestreutes Sonnenlicht.

2.4 Mehrfachstreuung in der Lidartechnik

Die Lidargleichungen (2) und (3) beruhen auf der Annahme von Einfachstreuung. Dabei durchläuft jedes im Lidar detektierte Photon genau einen Streuprozess in der Atmosphäre. Diese Annahme ist bei optisch dünnen Medien in sehr guter Näherung erfüllt. In optisch dicken Medien, wie z.B. Wolken, wird jedoch ein beträchtlicher Anteil des detektierten Lichts mehrfach gestreut. Dabei durchlaufen die Photonen eine Serie von Streuprozessen, wobei die Summe der Streuwinkel ca. 180° beträgt und der letzte Streuer im Gesichtsfeld des Teleskops liegt. Im Folgenden wird der Begriff Streuvorgang für solch eine Serie von Streuprozessen verwendet. In der Lidartechnik spielt Mehrfachstreuung im Allgemeinen nur bei Streuern eine Rolle, die groß im Verhältnis zur Wellenlänge des gestreuten Lichts sind. Die Streuung an Molekülen, die klein im Vergleich zur Wellenlänge sind, erfolgt nahezu isotrop. Bei großen Teilchen ist hingegen Vorwärtsstreuung der dominierende Prozess, bei dem Streuwinkel nahe 0° auftreten. Bis zu 50% des Streulichts wird in einen Winkelbereich von unter 1° um die Vorwärtsrichtung gelenkt [12]. Dadurch verbleibt ein hoher Anteil des Streulichts im kleinen Gesichtsfeld des Empfangsteleskops. Große Streuer sind unter anderem Wolkentröpfchen, die üblicherweise einen Radius von 4 bis $20 \mu\text{m}$ besitzen [3]. In Abb. 2 ist ein möglicher Verlauf eines Mehrfachstreuvorgangs dargestellt.

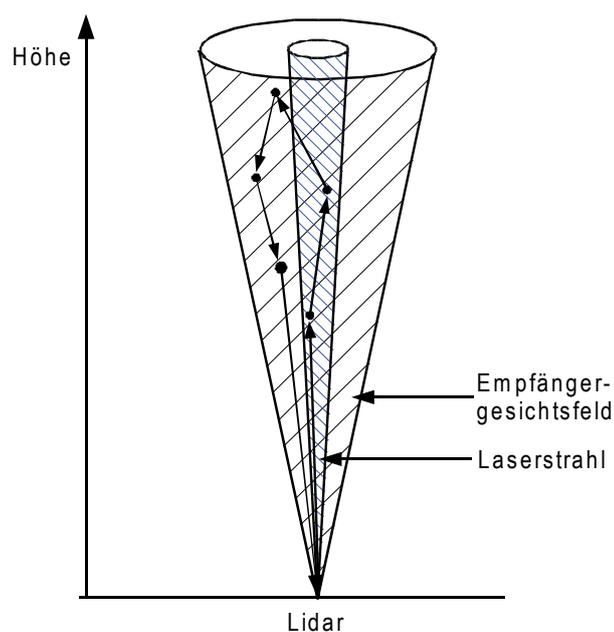


Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Mehrfachstreuvorgangs.

Die für den Fall von nicht vernachlässigbarer Mehrfachstreuung modifizierten Lidargleichungen werden im folgenden Abschnitt erläutert. Anschließend werden Parameter behandelt, die bei der Untersuchung von Wasserwolken einen Einfluss auf den Mehrfachstreuanteil eines Lidarsignals haben. In Abschnitt 2.4.3 wird dann ein Verfahren zur Bestimmung des Extinktionskoeffizienten und der Tröpfchengröße in Wasserwolken mit Hilfe von Mehrfachstreusignalen vorgestellt.

2.4.1 Lidargleichung bei Mehrfachstreuung

Durchläuft ein Laserstrahl eine Wolke, so wird ein Teil des gestreuten Lichts in die Vorwärtsrichtung gelenkt, bleibt damit im Gesichtsfeld des Lidars und kann durch folgende Streuprozesse zum Empfangstelekokps zurückgestreut werden. Dieser zusätzliche Signalanteil hat zur Folge, dass der unter Annahme von Einfachstreuung bestimmte Extinktionskoeffizient zu klein ist. Dies kann durch die Einführung eines Mehrfachstreuparameters F_i berücksichtigt werden [13, 14, 15]. Im Fall von ausschließlich elastischen Streuprozessen lautet dann die Lidargleichung:

$$P^{tot}(z, \lambda_0) = P_0 \frac{K(\lambda_0)O(z)}{z^2} \beta(z, \lambda_0) \times \exp \left[-2 \int_0^z \{ [1 - F_0(\zeta)] \alpha_P(\zeta, \lambda_0) + \alpha_M(\zeta, \lambda_0) \} d\zeta \right]. \quad (6)$$

Dabei wird der Extinktionskoeffizient α gemäß

$$\alpha = \alpha_P + \alpha_M \quad (7)$$

aufgespalten. Die Extinktionskoeffizienten α_P bzw. α_M beschreiben die Schwächung des Lichts durch Streuung an Partikeln bzw. Molekülen in der Atmosphäre. Der Mehrfachstreuparameter $F_0 > 0$ drückt aus, dass bei Mehrfachstreuung die effektive Schwächung des Lichts geringer als im Fall der Einfachstreuung ist. Es wird nur der Extinktionskoeffizient der Streuung an Partikeln korrigiert, da Moleküle nur einen vernachlässigbaren Anteil des Streulichts in Vorwärtsrichtung lenken.

Zur Mehrfachstreuung in Ramansignalen können theoretisch zwei unterschiedliche Streuvorgänge beitragen. Zum einen kann die Rückstreuung inelastisch erfolgen und auf dem Hin- und Rückweg wird das Photon mindestens einmal elastisch vorwärts gestreut. Zum anderen kann das Photon elastisch zurückgestreut werden und davor oder danach findet ein inelastischer Streuprozess in Vorwärtsrichtung statt. Vor und nach dem Rückstreuprozess können weitere elastische Streuprozesse in Vorwärtsrichtung erfolgen. Die Intensität des zweiten Streuvorgangs ist jedoch 3 bis 4 Größenordnungen kleiner als die des erstgenannten Prozesses und kann damit vernachlässigt werden [16, 17].

Es müssen nur Streuvorgänge betrachtet werden, in denen genau ein inelastischer Streuprozess vorkommt. Zum einen ist der Wirkungsquerschnitt bei Ramanstreuung ca. 6 Größenordnungen kleiner als bei elastischer Streuung, wodurch Streuvorgänge mit mehreren Ramanstreuprozessen einen verschwindenden Anteil am Gesamtsignal ausmachen. Zum anderen würde ein weiterer Ramanstreuprozess ein Signal bei einer anderen, nicht detektierten Wellenlänge ergeben. Analog zu Gleichung (6) kann auch hier ein Mehrfachstreuparameter $F_R(\zeta)$ eingeführt werden, mit dem sich die Lidargleichung zu

$$P_R^{tot}(z, \lambda_R) = P_0 \frac{K(\lambda_0)O(z)}{z^2} \beta(z, \lambda_0) \times \exp \left[- \int_0^z \{ [1 - F_R(\zeta)] [\alpha_P(\zeta, \lambda_0) + \alpha_P(\zeta, \lambda_R)] + \alpha_M(\zeta, \lambda_0) + \alpha_M(\zeta, \lambda_R) \} d\zeta \right] \quad (8)$$

ergibt.

2.4.2 Einflüsse auf den Mehrfachstreuanteil eines Lidarsignals

Die Messgeometrie hat einen großen Einfluss auf den Anteil mehrfach gestreuten Lichts am Lidarsignal. Dieser Anteil nimmt bei Vergrößerung des Volumens, aus dem gestreutes Licht detektiert wird, zu. Dadurch wächst die Intensität des mehrfach gestreuten Lichts mit größer werdendem Gesichtsfeld sowie mit der Zunahme des Abstands zwischen Lidar und Streuvolumen, also der Wolkenhöhe bei der Untersuchung von Wolken mit einem bodengestützten Lidar.

Ein weiterer Parameter, der einen großen Einfluss auf die Mehrfachstreuung hat, ist die Größe der streuenden Teilchen, die hier durch den effektiven Radius der Wolkentröpfchen ausgedrückt wird. Je größer die Wolkentröpfchen sind, desto ausgeprägter ist das durch Beugung verursachte Maximum der Streuphasenfunktion² bei kleinen Winkeln, also bei Vorwärtsstreuung. Dadurch wächst der Anteil des Lichts, das in einen kleinen Winkelbereich um die Vorwärtsrichtung gestreut wird, mit dem effektiven Radius der streuenden Tröpfchen. Dieser Sachverhalt ist die Ursache dafür, dass das Lidargesamtsignal streng monoton mit der Tröpfchengröße wächst, was Grein anhand von Simulationen gezeigt hat [18]. Der Verlauf der Phasenfunktionen bei der Streuung an Wolkentröpfchen, sowie zum Vergleich bei Ramanstreuung an Molekülen ist in Abb. 3 dargestellt.

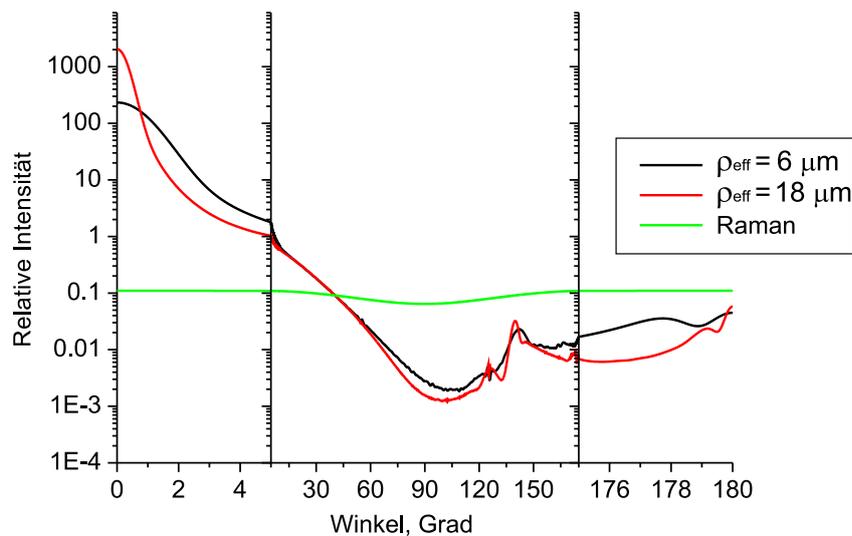


Abbildung 3: Phasenfunktionen bei der Streuung von Licht an Wolkentröpfchen mit einem effektiven Tröpfchenradius $\rho_{\text{eff}}=18 \mu\text{m}$ (schwarz) und $\rho_{\text{eff}}=6 \mu\text{m}$ (rot) und bei Ramanstreuung an Stickstoffmolekülen (grün).

Die Größe der streuenden Teilchen kann durch den effektiven Radius ρ_{eff} beschrieben werden, der sich gemäß

$$\rho_{\text{eff}} = \frac{\langle r^3 \rangle}{\langle r^2 \rangle} \quad (9)$$

ergibt. Dabei bezeichnet r den Radius eines Teilchens. Die spitzen Klammern stehen für die Mittelung über die Größenverteilung. Die Größe der streuenden Teilchen kann auch

²Die Streuphasenfunktion beschreibt die relative Intensität des Streulichts in Abhängigkeit vom Streuwinkel. Das Integral der Streuphasenfunktion über alle Raumwinkel (ϑ, φ) beträgt 1.

durch den dimensionslosen effektiven Größenparameter x beschrieben werden. Im Fall ausschließlich elastischer Streuung von Licht der Wellenlänge λ_0 ergibt er sich zu

$$x = \frac{2\pi\rho_{\text{eff}}}{\lambda_0}. \quad (10)$$

Ist am Streuvorgang ein Ramanstreuprozess beteiligt, so dass Licht mit λ_0 ausgesandt und Licht mit λ_R detektiert wird, berechnet sich der effektive Größenparameter zu

$$x = \pi\rho_{\text{eff}}\left(\frac{1}{\lambda_0} + \frac{1}{\lambda_R}\right). \quad (11)$$

Die Form der Größenverteilung der streuenden Teilchen hat hingegen keinen Einfluss auf den Mehrfachstreuanteil des Lidarsignals [18].

2.4.3 Bestimmung des Extinktionskoeffizienten und der Tröpfchengröße in Wolken

Die in Abb. 3 dargestellte Abhängigkeit der Streuphasenfunktion vom effektiven Radius der streuenden Wolkentröpfchen macht es prinzipiell möglich, mit Hilfe von Mehrfachstreusignalen Tröpfchengrößen in Wolken abzuleiten. Dabei wird ausgenutzt, dass durch die Vorwärtsstreuungsprozesse das gestreute Licht eine Winkelauslenkung erfährt, weil die Streuwinkel nicht bei exakt 0° liegen. Wird das zurückgestreute Licht mit mehreren unterschiedlichen Gesichtsfeldern gemessen, können Informationen über die Winkelauslenkung bei Vorwärtsstreuung gewonnen werden. Die Winkelauslenkung resultiert aus der Breite des Beugungsmaximums. Diese Breite ist von der Tröpfchengröße abhängig, wie in Abschnitt 2.4.2 erläutert wurde. Damit ist es prinzipiell möglich, Tröpfchengrößen durch Lidarmessungen mit mehreren Gesichtsfeldern zu bestimmen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde eine von Malinka und Zege entwickelte Methode zur Bestimmung von Tröpfchengrößen aus Lidarsignalen experimentell umgesetzt. Dabei wird mit zwei Gesichtsfeldern an Stickstoffmolekülen inelastisch zurückgestreutes Licht detektiert [2, 3]. Aufgrund der sehr gut isotropen Phasenfunktion für den Rückstreuvorgang (siehe Abb. 3) wird die Winkelabhängigkeit des detektierten Lichts ausschließlich durch die Phasenfunktionen der Vorwärtsstreuungsprozesse bestimmt, die eindeutige Funktionen der Tröpfchengröße sind. Außerdem kann mit dem Verfahren aus den Lidarsignalen der beiden Gesichtsfelder der Extinktionskoeffizient in der Wolke bestimmt werden.

Der von Malinka und Zege vorgeschlagene Inversionsalgorithmus arbeitet iterativ [3]. Zunächst werden für den Extinktionskoeffizienten und die Tröpfchengröße Startwerte initialisiert. Für den effektiven Radius der Tröpfchen werden $9\ \mu\text{m}$ angesetzt. Der Extinktionskoeffizient wird in erster Näherung aus dem Lidarsignal des kleinen Gesichtsfelds ohne Berücksichtigung von Mehrfachstreuung ermittelt. Dann wird aus diesen Werten das dazugehörige Lidarsignal berechnet. Aus der Abweichung des berechneten vom gemessenen Signal werden die Werte für den Extinktionskoeffizienten und die Tröpfchengröße neu berechnet. Die für dieses Verfahren geeigneten Gesichtsfelder wurden gemäß den Angaben in Ref. [3] ermittelt. Dies ist im Folgenden dargestellt.

Gesichtsfeld zur Bestimmung des Extinktionskoeffizienten

Die Größe des kleineren Gesichtsfeld sollte so gewählt sein, dass mit diesem der Extinktionskoeffizient möglichst genau ermittelt werden kann. Dies ist bei dem Gesichtsfeld der

Fall, bei dem der Anteil von einfach gestreutem Licht am empfangenen Signal maximal wird. In Ref. [3] wurde dieses Gesichtsfeld zu

$$\gamma_1 < FOV_1 < \gamma_2 \quad (12)$$

bestimmt. Die Untergrenze γ_1 für das Gesichtsfeld FOV_1 wird gemäß

$$\gamma_1 = \max \left\{ \delta_{Las}, \frac{D_T}{z+H}, \frac{D_{Las}}{z+H} \right\} \quad (13)$$

berechnet. Dabei gehen die Divergenz des ausgesandten Laserstrahls δ_{Las} , der Durchmesser des Hauptspiegels D_T , der Durchmesser D_{Las} des Laserstrahls in Bodennähe, die Eindringtiefe z des Laserstrahls in die Wolke und die Höhe H der Wolkenunterkante ein. Alle hier angegebenen Winkel und damit auch Gesichtsfelder sind als Vollwinkel zu verstehen. Sofern nicht anders angegeben, gilt dies generell auch für die weiteren Winkelangaben und -bezeichnungen in dieser Arbeit.

Die Obergrenze γ_2 für das Gesichtsfeld FOV_1 ergibt sich zu

$$\gamma_2 = \delta_{Las} + \frac{D_T}{z+H} + \frac{D_{Las}}{z+H}. \quad (14)$$

Malinka und Zege schlagen für das Gesichtsfeld FOV_1 zur Messung des Extinktionskoeffizienten die Größe

$$FOV_1 = \frac{D_T}{H} \quad (15)$$

vor, da für diese die Beziehung (12) stets erfüllt ist [3].

Gesichtsfeld zur Detektion von Mehrfachstreuung

Für das größere Gesichtsfeld wurde das Optimum zu

$$FOV_2 = 2 \frac{z}{xH} \quad (16)$$

bestimmt [3, 18]. Bei diesem Wert reagiert das Lidarsignal am empfindlichsten auf den effektiven Radius der Wolkentröpfchen. In die Berechnung des Gesichtsfelds geht neben der Höhe der Wolkenunterkante H auch die Eindringtiefe z des Laserstrahls in die Wolke und der effektive Größenparameter x ein. Dies erscheint problematisch, soll doch eben der effektive Größenparameter bestimmt werden. In Ref. [3] wird jedoch gezeigt, dass die Empfindlichkeit gegenüber dem effektiven Tröpfchenradius in der Nähe ihres Maximums bei der Variation der Größe des Gesichtsfelds nur sehr schwach abfällt. Tröpfchenradien in Wolken liegen im Bereich von 2 bis $30 \mu\text{m}$ [19]. Malinka und Zege vereinfachen Gleichung (16) deutlich, indem sie in diese Gleichung als typischen Wert für den effektiven Tröpfchenradius $\rho_{\text{eff}} = 9 \mu\text{m}$ einsetzen [3]. Damit erhält man als Beziehung für ein optimales Gesichtsfeld zur Bestimmung der effektiven Tröpfchengröße

$$FOV_2 \approx 0.02 \frac{z}{H}. \quad (17)$$

Weiterhin konnte Grein mit Hilfe von Simulationen von Lidarsignalen zeigen, dass mit den nach den Gleichungen (12) und (16) berechneten Gesichtsfeldern die Signale in den entsprechenden Einfach- und Mehrfachstreukanälen im selben Größenbereich liegen [18]. Dies ist günstig, da so für die Auswertung Signale mit ausreichend hoher Intensität zur Verfügung stehen und Fehler, resultierend aus Rauschen, minimiert werden.

3 Ramanlidar MARTHA: Aufbau und vorgenommene Umbauarbeiten

In diesem Kapitel wird das Ramanlidar MARTHA beschrieben. Weiterhin werden die am Lidar vorgenommenen Umbauarbeiten begründet und erläutert. Dazu wird zunächst einführend der allgemeine Aufbau des Ramanlidars erklärt. In Abschnitt 3.2 wird das Empfangsteleskop behandelt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein neues Teleskop in das Lidar eingebaut und justiert. Anschließend wird auf das Gesichtsfeld, die sogenannte Überlappungsfunktion und die Feldblende eingegangen. In Abschnitt 3.4 wird die Strahlseparationseinheit, die neu aufgebaut und erweitert wurde, erläutert. Dabei werden Überlegungen bzgl. des Strahlengangs angestellt und die einzelnen darin enthaltenen Komponenten beschrieben. Der Abschnitt 3.5 behandelt den Strahlengang durch den Empfänger des Lidars, vom Empfangsteleskop bis zu den PMTs. Dabei werden die Anforderungen an den Strahlengang sowie deren Realisierung dargelegt.

3.1 Allgemeiner Aufbau des Ramanlidars MARTHA

Das Ramanlidar MARTHA ist ein stationäres Lidarsystem zur Messung von Aerosoleigenschaften, Wasserdampf und Temperatur. Der schematische Aufbau des Lidars ist in Abb. 4 dargestellt.

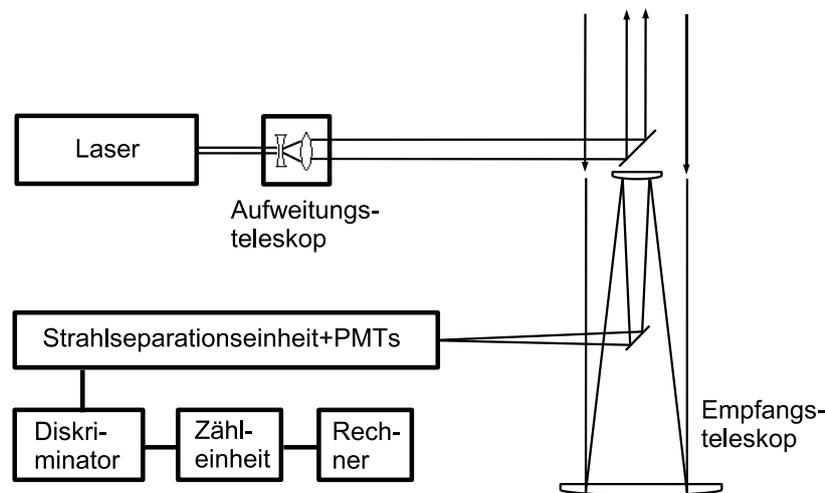


Abbildung 4: Schematische Darstellung des IfT-Ramanlidars MARTHA.

Die Lichtquelle des Lidars ist der leistungsstarke Nd:YAG-Laser Quanta Ray PRO 290 von Spectra Physics, der Pulse mit einer Länge von 8 bis 9 ns erzeugt. Die Pulswiederholungsrate beträgt 30 Hz. Neben der Fundamentalwellenlänge von 1064 nm wird auch die frequenzverdoppelte und frequenzverdreifachte Strahlung mit der Wellenlänge 532 bzw. 355 nm emittiert. Die Gesamtenergie eines Laserpulses beträgt rund 1500 mJ. Davon wird ca. ein Drittel bei 532 nm emittiert. Die Pulse mit 355 nm besitzen eine Energie von ca. 200 mJ. Das Licht der Wellenlängen 355 und 532 nm ist linear polarisiert, das der Wellenlänge 1064 nm elliptisch polarisiert.

Der Laserstrahl läuft zunächst durch ein Aufweitungsteleskop. Dort wird dessen Durchmesser auf 150 mm aufgeweitet. Dadurch verkleinert sich die Strahldivergenz auf ca. 0.1 mrad. Anschließend wird der Strahl über einen dielektrisch beschichteten, elliptischen Umlenkspiegel vertikal in die Atmosphäre ausgelenkt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde der bisherige Umlenkspiegel ersetzt. Dieser hatte eine kleine Achse von ca. 100 mm, weshalb vom aufgeweiteten Laserstrahl der äußere, intensitätsschwache Rand mit Hilfe einer Serie von Blenden abgeschattet werden musste. Der neue Umlenkspiegel ist ausreichend groß, so dass der Laserstrahl jetzt mit seinem vollen Durchmesser ausgesendet werden kann. Die Daten des Laserumlenkspiegels sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Daten des Laserumlenkspiegels.

Hersteller	Hellma Optik
Beschichtung	HR 355, 532, 1064 nm
Länge große Achse	(212.1 ± 0.2) mm
Länge kleine Achse	(150.0 ± 0.2) mm
Substratdicke	(20 ± 0.2) mm

Das aus der Atmosphäre zurückgestreute Licht wird zunächst von einem Cassegrain-Teleskop gesammelt. Dieses befindet sich direkt unter dem Laserauslenkspiegel, wodurch Ausbreitungsrichtung des Laserstrahls und optische Achse des Teleskops übereinstimmen. So lässt sich die für diesen Aufbau gebräuchliche Bezeichnung „monoaxiales System“ verstehen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein neues Empfangsteleskop in das Lidar eingebaut. Das Teleskop besteht aus einem Hauptspiegel, Fangspiegel und einem elliptischen Umlenkspiegel, der das einfallende Licht auf einen optischen Tisch lenkt. Dort passiert es zunächst die sogenannte „Spiegelblende“. Diese lässt aus einem kleinen Gesichtsfeld einfallendes Licht in die Einfachstreukanäle durch und reflektiert Licht aus einem definierten größeren Gesichtsfeld unter 90° in die Nachweiskanäle für Mehrfachstreuung. Anschließend werden die jeweiligen Strahlenbündel in der Strahlseparationseinheit in die einzelnen Nachweiskanäle bzgl. Wellenlänge und Polarisationszustand aufgespalten. Die Detektion des Lichts erfolgt durch Photomultiplier.

Das Ramanlidar MARTHA arbeitet mit zwölf Kanälen. Zum einen werden die elastisch zurückgestreuten Signale der Wellenlängen 355, 532 und 1064 nm detektiert. In drei weiteren Nachweiskanälen wird ramangestreutes Licht detektiert. Zum einen ist dies Licht mit den Wellenlängen 387 und 607 nm. Die Photonen dieser Wellenlängen entstehen durch Ramanstreuung von Licht der Wellenlänge 355 bzw. 532 nm an Stickstoffmolekülen in der Atmosphäre. Zum anderen wird das an Wassermolekülen ramangestreute Licht der Anregungswellenlänge 355 nm detektiert. Dieses Licht hat eine Wellenlänge von 407 nm. Damit kann das Vertikalprofil des Wasserdampfgehalts in der Atmosphäre bestimmt werden. Weiterhin gibt es zwei Kanäle, mit denen der Polarisationszustand des zurückgestreuten Lichts bei 532 nm analysiert wird. Dabei detektiert der im Folgenden mit 532h bezeichnete Nachweiskanal Licht, das horizontal, und damit senkrecht zur emittierten Laserstrahlung mit der Wellenlänge 532 nm, polarisiert ist. Der Kanal für die Detektion von vertikal polarisiertem Licht wird im Folgenden mit 532v bezeichnet. Informationen zur Ermittlung des Temperaturprofils der Atmosphäre liefern zwei weitere Nachweiskanäle. Dafür werden Signale in verschiedenen Bereichen des Rotations-Ramanspektrums von Stickstoff

und Sauerstoff nahe der Anregungswellenlänge 532 nm aufgenommen. Zwei Kanäle, um die das Ramanlidar MARTHA im Rahmen der vorliegenden Arbeit erweitert wurde, empfangen mehrfach gestreutes Licht. Dabei detektiert ein Kanal elastisch gestreutes Licht bei 532 nm. Ein weiterer Kanal detektiert das an Stickstoffmolekülen inelastisch gestreute Licht der Wellenlänge 607 nm. Mit den Lidarsignalen dieses Nachweiskanals und des Nachweiskanals für einfach gestreutes Licht mit der Wellenlänge von 607 nm ist es möglich, mit der in Abschnitt 2.4.3 beschriebenen Methode Tröpfchengrößen in Wolken zu bestimmen.

Die elektrischen Signale der Photomultiplier, die im Photonen-zählmodus betrieben werden, werden zunächst von einem Diskriminator verarbeitet. Dort werden alle Spannungspulse, die oberhalb einer einzustellenden Diskriminatorschwelle liegen, in einheitliche Standardpulse umgewandelt, die anschließend von einer Zählleinheit zeitaufgelöst aufgenommen werden. Diese ist mit einem Rechner verbunden, der die empfangenen Signale aufzeichnet.

3.2 Teleskop

Das neu eingebaute Empfangsteleskop wurde von der Firma Astrooptik geliefert. Die Parameter des Teleskops wurden von Grein berechnet [18]. Das Teleskop ist vom Cassegrain-Typ und besteht damit aus einem parabolischen Hauptspiegel (auch: Primärspiegel), einem hyperbolischen Fangspiegel (auch: Sekundärspiegel) und einem planen Umlenkspiegel (auch: Tertiärspiegel). Die Spiegel sind Aluminiumspiegel, die mit einer Siliziumoxid-Schutzschicht versehen sind. Die wichtigsten Teleskopparameter sind in Tabelle 2 aufgeführt und in Abb. 5 dargestellt. In Abb. 6 ist der Aufbau des Teleskops zu sehen.

Tabelle 2: Parameter des Empfangsteleskops.

effektive Brennweite	F	8974 mm
Abstand Primärspiegel–Sekundärspiegel	l	1579 mm
Abstand Sekundärspiegel–Tertiärspiegel	a	779 mm
hintere Brennweite	$l + s$	1890 mm
Durchmesser Primärspiegel (optisch)	d_1	805 mm
Brennweite Primärspiegel	f_1	2000 mm
konische Konstante Primärspiegel	K_1	-1
Durchmesser Sekundärspiegel	d_2	180 mm
Brennweite Sekundärspiegel	f_2	-541.7 mm
konische Konstante Sekundärspiegel	K_2	-2.48
Länge kleine Achse ellipt. Umlenkspiegel	d_3	128 mm

Ein wesentlicher Unterschied dieses Teleskops im Vergleich zum Vorgänger ist die deutlich größere hintere Brennweite $l + s$. Damit liegt der Brennpunkt des Teleskops nicht wie bisher oberhalb des Umlenkspiegels, sondern auf dem optischen Tisch der Empfängerbank. Dies ist eine Notwendigkeit für den Aufbau der Mehrfachstreukanäle.

Die effektive Brennweite des Teleskops F ergibt sich aus den Brennweiten des Primärspiegels f_1 und des Sekundärspiegels f_2 sowie dem Abstand l zwischen beiden Spiegeln zu

$$F = \frac{f_1 f_2}{f_1 + f_2 - l}. \quad (18)$$

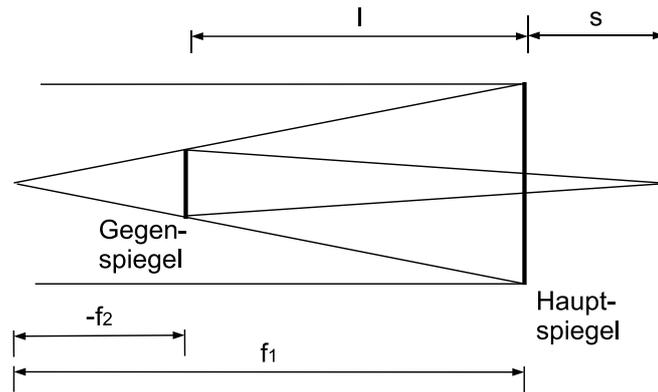


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Parameter eines Cassegrain-Teleskops.

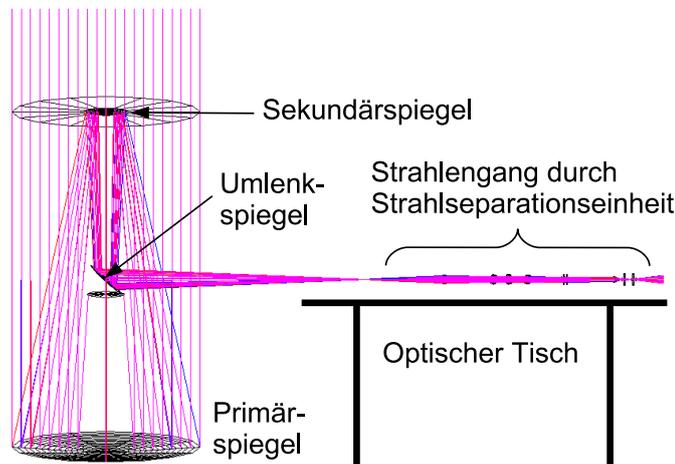


Abbildung 6: Aufbau des Empfangsteleskops des Ramanlidars MARTHA.

Weiterhin ist die effektive Brennweite F über

$$F = \frac{f_1}{f_1 - l}(l + s) \quad (19)$$

mit der hinteren Brennweite $l + s$ verknüpft. Die konische Konstante K_2 des Sekundärspiegels muss die Beziehung

$$K_2 = - \left(\frac{f_1 + s}{2l - f_1 + s} \right)^2 \quad (20)$$

erfüllen, damit sphärische Abberationen vermieden werden.

3.3 Gesichtsfeld, Feldblende und Überlappungsfunktion

Der folgende Abschnitt behandelt die Themen Gesichtsfeld, Feldblende und Überlappungsfunktion. Zunächst werden die gewählten Gesichtsfelder für den Nachweis von Einfach- und Mehrfachstreuung begründet. Anschließend wird die Realisierung der Gesichtsfelder

mittels einer Spiegelblende beschrieben. In Abschnitt 3.3.3 werden die in Abschnitt 2.3 dargelegten Überlegungen bezüglich des Gesichtsfelds auf den Fall von Rückstreuung aus endlichen Höhen übertragen. Weiterhin wird die Überlappungsfunktion definiert und erläutert.

3.3.1 Verwendete Gesichtsfelder

In die Gleichungen (12) bis (17) zur Bestimmung der optimalen Gesichtsfelder geht die Höhe H der Wolkenunterkante ein. Damit Wolken in verschiedenen Höhenbereichen untersucht werden können, wurden drei verschieden große Blenden und damit Gesichtsfeldkombinationen realisiert. Reine Wasserwolken sind üblicherweise bis zu Temperaturen von -18 bis -20 °C zu finden [20]. Im Höhenprofil der Jahresmitteltemperaturen über Leipzig entsprechen diese Temperaturen einer Höhe von 5 bis 6 km. Entsprechend war eine Vorgabe, eine Gesichtsfeldkombination so zu wählen, dass bis in diese Höhen gemessen werden kann. Weiterhin gab es die Zielstellung, möglichst tiefe Wolken in ca. 1 km Höhe untersuchen zu können. Schließlich sollte eine Gesichtsfeldkombination den Höhenbereich zwischen den beiden anderen Kombinationen abdecken können. Mit dieser Gesichtsfeldkombination sollte es außerdem möglich sein, in dem Höhenbereich zu messen, in dem die Überlappungsfunktion nur noch wenig wächst oder konstant 1 ist. Weiterhin sollte dort das Gesichtsfeld für die Detektion von Einfachstreuung nicht stark vom Gesichtsfeld des bisherigen Aufbaus von 0.4 mrad abweichen, damit sich die Systemparameter für Standardmessungen nicht zu stark ändern.

Die untere Grenze für das Gesichtsfeld γ_1 aus den Gleichungen (12) und (13) ergibt sich bei den Systemparametern des Ramanlidars MARTHA (siehe Tabellen 1 und 2) bis zu einer Höhe der Wolkenunterkante von 7 km zu

$$\gamma_1 = \frac{D_T}{z + H}. \quad (21)$$

Die Berechnung der Blendendurchmesser für das kleine Gesichtsfeld erfolgte mit den Gleichungen (12) und (15) für drei unterschiedliche Höhenbereiche der Wolkenunterkante. Die Größe der Gesichtsfelder für die Detektion von Mehrfachstreuung wurden in den gleichen Höhenbereichen mit Gleichung (17) bestimmt. Die Gesichtsfeldkombinationen und die Höhenbereiche der Wolkenunterkante, in denen damit der Radius der Wolkentröpfchen bestimmt werden kann, sind in Tabelle 3 aufgeführt. In Tabelle 4 sind die Durchmesser der Blenden angegeben, mit denen die jeweiligen Gesichtsfelder gemäß Gleichung (5) realisiert werden.

Tabelle 3: Gesichtsfelder der Ein- und Mehrfachstreukanäle des Ramanlidars MARTHA und Höhenbereich der Wolkenunterkante, in dem mit der jeweiligen Gesichtsfeldkombination gemessen werden kann.

Gesichtsfeld des Einfachstreukanals	Gesichtsfeld des Mehrfachstreukanals	Höhenbereich der Wolkenunterkante
0.28 mrad	0.78 mrad	2.5–5.5 km
0.50 mrad	2.00 mrad	1.3–2.5 km
0.78 mrad	3.80 mrad	0.7–1.3 km

Tabelle 4: Gesichtsfelder der Ein- und Mehrfachstreukanäle und dazugehörige Blendendurchmesser.

Gesichtsfeld des Einfachstreukanals	Blendendurchmesser im Einfachstreukanal	Gesichtsfeld des Mehrfachstreukanals	Blendendurchmesser im Mehrfachstreukanal
0.28 mrad	2.5 mm	0.78 mrad	7.0 mm
0.50 mrad	4.5 mm	2.00 mrad	18.0 mm
0.78 mrad	7.0 mm	3.80 mrad	36.0 mm

Die Wahl der Gesichtsfelder unterlag der Einschränkung, dass kleine Blendendurchmesser dazu führen, dass die Überlappungsfunktion erst in großen Höhen ihr Maximum erreicht. Außerdem wird es mit abnehmendem Gesichtsfeld schwieriger den Laserstrahl im Empfängergesichtsfeld zu halten. Das System reagiert dann empfindlicher auf Justierfehler. Deshalb wurde das kleinste Gesichtsfeld für die Einfachstreukanäle auf 0.28 mrad festgelegt, obwohl nach Gleichung (12) ein um etwa 0.1 mrad kleineres Gesichtsfeld hätte gewählt werden sollen.

3.3.2 Spiegelblende

Damit bei der Trennung des Lichts in Einfach- und Mehrfachstreukanäle vermieden wird, dass die Intensität des einfallenden Lichts auf beide Nachweiszweige aufgeteilt werden muss, wird mit einer Spiegelblende gearbeitet. Diese lässt Licht aus einem kleinen Gesichtsfeld passieren und reflektiert Licht aus einem größeren Gesichtsfeld unter 90°. Das Prinzip dieser Blende und der Strahlengang an der Blende sind in Abb. 7 verdeutlicht.

Die Blende befindet sich unter einem Winkel von 45° im Strahlengang des Empfängers. Sie besitzt ein mittiges Loch, das unter 45° gebohrt wurde. Dadurch erscheint die Bohrung bei Betrachtung unter 45° kreisrund und kann als Blende genutzt werden. Die Dicke der Spiegelsubstrate beträgt 2 mm. Eine geringe Dicke ist günstig, damit zusätzliche Abschattungen entlang der Tiefenausdehnung der Blende vermieden werden. Dadurch wäre das Gesichtsfeld unsauber definiert. Die Spiegelsubstrate bestehen aus BK7-Glas und haben einen Durchmesser von 50.8 mm (2"). Die Substrate wurden von der Befort Wetzlar OHG gefertigt und von der Laseroptik GmbH mit einer im Wellenlängenbereich von 530 bis 630 nm hochreflektierenden, dielektrischen Schicht versehen. Vor der Spiegelblende befindet sich eine elliptische Lochblende, die bei Betrachtung unter 45° kreisrund erscheint. Durch diese Blende wird das Gesichtsfeld für das Licht definiert, das an der Spiegelblende in die Mehrfachstreukanäle reflektiert wird. Es wurden drei Kombinationen von Spiegelblenden und Lochblenden gefertigt. Deren Durchmesser und die drei damit realisierten Gesichtsfeldkombinationen sind in Tabelle 4 angegeben.

Jede Kombination aus Spiegelblende und Lochblende wird mittels zweier Feststellringe in einer Fassung LM2-A von Thorlabs gehalten. Diese kann sehr gut reproduzierbar von der Halterung LM2-B von Thorlabs aufgenommen werden, wodurch ein Wechsel der Blenden und damit Gesichtsfeldkombinationen problemlos möglich ist. In Abb. 8 sind die Gesichtsfelder für die Detektion von Einfach- (FOV_{ss}) und Mehrfachstreuung (FOV_{ms}) dargestellt. Das Gesichtsfeld für die Detektion von Mehrfachstreuung ist dabei nicht ein voller Kegel, wie es in der Lidartechnik üblich ist, sondern hat eine kegelförmige Aussparung. Die Aussparung entspricht dem Gesichtsfeld zur Detektion der Einfachstreuung.

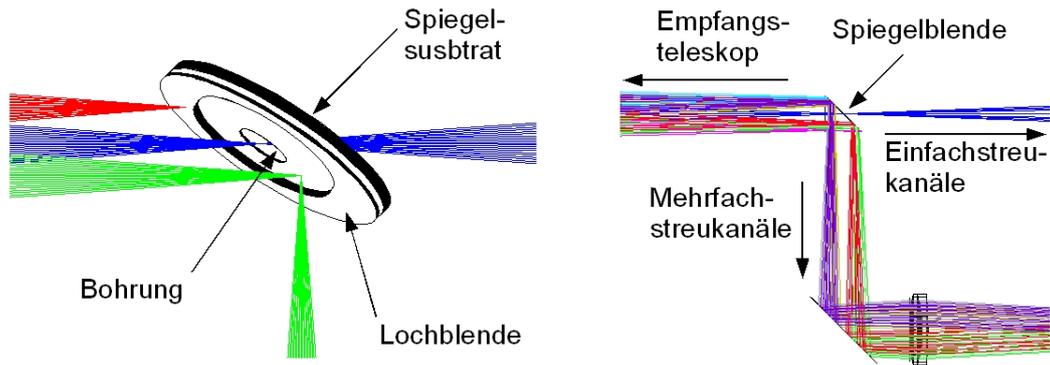


Abbildung 7: Links: Veranschaulichung der Wirkungsweise der Spiegelblende. Eine Lochblende bestimmt das Gesichtsfeld beim Nachweis von Mehrfachstreuung und schattet Licht mit zu großen Einfallswinkeln (rot dargestellt) ab. Strahlen aus dem Gesichtsfeld zur Detektion von Mehrfachstreuung (grün) werden unter 90° reflektiert. Eine Bohrung im Spiegelsubstrat fungiert als Blende für die Detektion von Einfachstreuung und lässt nur Strahlen aus einem kleinen Gesichtsfeld (blau) passieren. Rechts: Strahlengang an der Spiegelblende im Empfänger des Ramanlidars MARTHA. Strahlen unterschiedlicher Farben kommen aus unterschiedlichen Bereichen des Empfängergesichtsfelds.

Da beim Entwurf des System noch nicht bekannt war, ob die Schrägstellung der Blende für die Einfachstreukanäle einen Einfluss auf die Lidarsignale hat, wurden auch drei Blenden gefertigt, die orthogonal zur optischen Achse in den Empfänger positioniert werden können. Die Blendendurchmesser entsprechen den Durchmessern der Bohrungen in den Spiegelblenden für die Einfachstreukanäle. Die Stärke der Blenden beträgt 2 mm und der Durchmesser 50.8 mm. Damit können auch diese Blenden von den Thorlabs-Fassungen LM2-A gehalten werden, die wiederum von der LM2-B Halterung aufgenommen werden.

Die nötige Drehung der Blendenhalterung um 45° bei der Benutzung dieser Blenden wird mit der Halterung LI2-2000 von Linos realisiert. Diese Halterung besteht aus einem Sockel, auf den ein Kopf gesteckt werden kann. Der Kopf ist auf dem Sockel sehr gut reproduzierbar in 15° -Schritten drehbar. Auf dem Kopf ist die erwähnte LM2-B Halterung von Thorlabs montiert. Die einzelnen Blenden befinden sich nicht über der Drehachse dieser Halterung. Dadurch entsteht bei einer Drehung um 45° ein seitlicher Versatz der Blendenöffnung. Dieser wird korrigiert, indem die Bohrung der Blenden, die orthogonal im Strahlengang stehen, um 4.9 mm seitlich versetzt ist. Die Übereinstimmung der Blendenpositionen im Empfänger wurde mit Hilfe eines Justierlasers überprüft.

Damit kein Licht unter Umgehung der Feldblende in die Empfängeroptik gelangt und evtl. als Streulicht detektiert wird, befindet sich die Blende innerhalb einer Kammer. Dadurch wird Licht mit sehr großen Einfallswinkeln abgeschattet.

3.3.3 Rückstreuung aus endlichen Höhen und Überlappungsfunktion

In Abschnitt 2.3 wurde der Fall betrachtet, dass das mit dem Lidar detektierte Licht in unendlicher Höhe zurückgestreut wurde. Dieses Licht wird im Fokus des Teleskops gebündelt. Bildet das Teleskop vom Laserstrahl beleuchtete Teilvolumina in nicht unendlicher

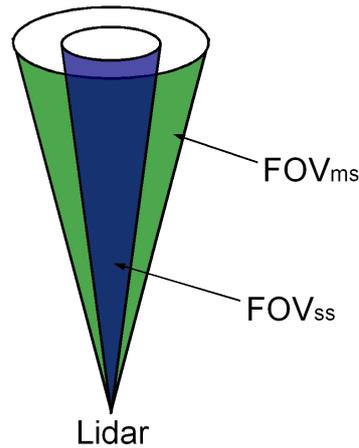


Abbildung 8: Gesichtsfelder zur Detektion von Einfach- (FOV_{ss}) und Mehrfachstreuung (FOV_{ms}) bei Verwendung einer Spiegelblende. Das Gesichtsfeld für die Detektion von Mehrfachstreuung ist kein voller Kegel, sondern besitzt eine mittige Aussparung der Größe FOV_{ss} .

Entfernung g ab, so entsteht deren Bild hinter dem Fokus, d.h. in einem größeren Abstand b zum Teleskop. Dies wird durch die Gaußsche Abbildungsgleichung

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b} \quad (22)$$

beschrieben. Mit der Gleichung

$$\frac{b}{B} = \frac{g}{G} \quad (23)$$

kann die Größe B des entstehenden Bilds eines Gegenstands der Größe G berechnet werden. Bei Rückstreuhöhen g von 1 bis 60 km und Gegenstandsgrößen (Laserstrahldurchmessern) G von 0.25 m in 1 km Höhe bis 6.15 m in 60 km Höhe beträgt B nach Gleichung (23) 1.8 bzw. 0.9 mm. Aufgrund dieser geringen Größe kann man von einem „Brennpunkt“ für Strahlen aus der Höhe g sprechen. Jeder Höhenbereich hat eine etwas andere „Brennweite“. Zum Beispiel liegt der Brennpunkt für Strahlen aus 4 km Höhe 20 mm hinter dem eigentlichen Fokus des Teleskops. Wie sich die Lage des Brennpunkts mit der Höhe des Rückstreuorts ändert, ist in Abb. 9 zu sehen. Dort ist der Strahlengang an Blende und Kollimator für die Rückstreuhöhen 1, 4 und 50 km abgebildet.

Durch die verschiedene Lage der Brennpunkte für unterschiedliche Rückstreuhöhen ist das Licht im Allgemeinen am Ort der Blende nicht vollständig fokussiert. Dies hat zur Folge, dass einerseits Licht außerhalb des in Gleichung (5) definierten Gesichtsfelds die Blende passieren kann und andererseits Strahlung aus dem Bereich des Gesichtsfelds von der Blende abgeschattet wird. Der Anteil des auf das Teleskop treffenden rückgestreuten Laserlichts, der die Feldblende passieren kann, wird in Abhängigkeit von der Rückstreuhöhe durch die Überlappungsfunktion beschrieben.

In Abb. 10 sind die Überlappungsfunktionen für die für Detektion von Einfachstreuung verwendeten Gesichtsfelder von 0.28, 0.50 und 0.78 mrad dargestellt. Die Überlappungsfunktionen wurden aus einer jeweils ca. einstündigen Messung am Abend des 17.11.2008 ermittelt. An diesem Abend war der Aerosolgehalt in der Luft sehr gering, was günstig

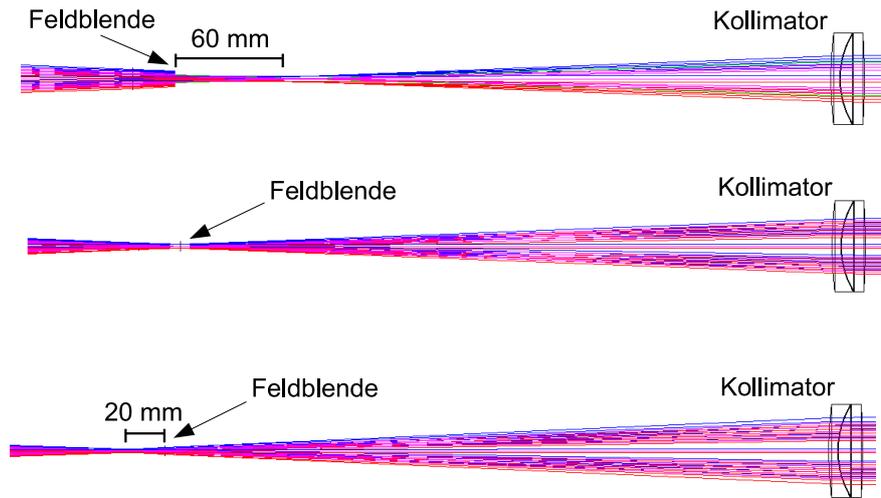


Abbildung 9: Veranschaulichung der Abhängigkeit der Lage des Brennpunkts des Teleskops von der Höhe des Rückstreuroorts. Der Abstand zwischen Brennpunkt und Feldblende ist eingezeichnet. Die Höhe der Rückstreuung beträgt in der oberen Abbildung 1 km, in der mittleren 4 km und in der unteren 50 km.

für die Genauigkeit der ermittelten Überlappungsfunktionen ist. Die Methode, mit der die Überlappungsfunktion aus der Messung eines Ramanlidars bestimmt werden kann, ist in Ref. [21] beschrieben. Die Überlappungsfunktion wurde auch mit dem Strahlverfolgungsprogramm Zemax bestimmt. Darauf wird in Abschnitt 4.2 eingegangen.

In kleinen Rückstreu Höhen ist die Überlappungsfunktion zunächst gleich Null, nimmt dann mit steigender Höhe zu und erreicht je nach Empfängergesichtsfeld zwischen ca. 2.5 und 3.2 km ihr Maximum von 1. Dieser Verlauf ist darin begründet, dass der Brennpunkt von Licht aus kleinen Rückstreu Höhen hinter der Feldblende liegt. Dementsprechend hat der auf die Blende treffende Lichtstrahl einen endlichen Durchmesser und wird teilweise abgeschattet. Mit steigender Rückstreu Höhe bewegt sich der Brennpunkt in Richtung Blende. Dadurch verringert sich der Strahldurchmesser am Ort der Blende und der Anteil der Strahlen, die die Feldblende passieren können nimmt zu. Anhand dieser Überlegungen wird auch klar, warum die Überlappungsfunktion für größere Gesichtsfelder, also Blendendurchmesser, bereits in kleineren Höhen ihr Maximum erreicht: Je größer die Feldblende ist, desto weniger Abschattungen treten bei gleichen Strahldurchmessern an der Blende auf.

Weiterhin kann man folgern, dass der Verlauf der Überlappungsfunktion von der Position der Feldblende abhängig ist. Wird die Feldblende hinter den Fokus des Teleskops gesetzt, verringert sich der Abstand zwischen den Brennpunkten aus kleinen Rückstreu Höhen und der Blende. Dadurch erreicht die Überlappungsfunktion bereits in kleinen Höhen ihr Maximum. Andererseits ist es möglich, dass die Überlappungsfunktion ab einer bestimmten Höhe wieder abnimmt, wenn sich die Feldblende zu weit hinter dem Fokus des Teleskops befindet. Das ist der Fall, wenn sich der Brennpunkt aus der entsprechenden Rückstreu Höhe so weit vor der Blende befindet, dass am Ort der Feldblende der Strahldurchmesser auf eine Größe angewachsen ist, bei der es zu Abschattungen an der Blende kommt. Im Ramanlidar MARTHA befindet sich die Feldblende 20 mm hinter dem Fo-

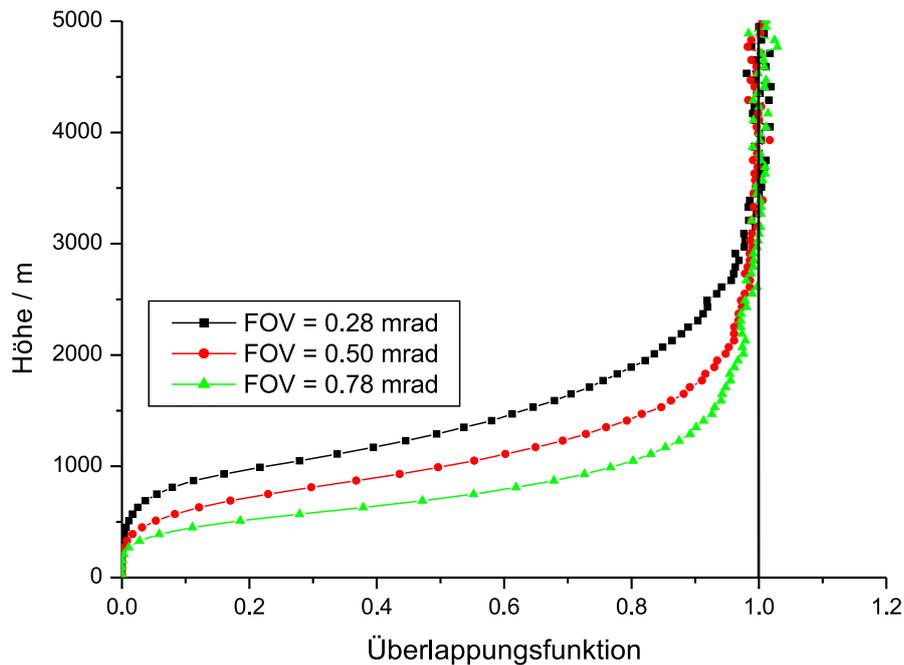


Abbildung 10: Aus Messungen ermittelte Überlappungsfunktionen des Ramanlidars MARTHA bei den Gesichtsfeldern von 0.28, 0.5 und 0.78 mrad.

kus des Teleskops. In dieser Konfiguration wurde ein Abfall der Überlappungsfunktion in großen Höhen weder anhand von Messungen noch mit dem Strahlverfolgungsprogramm Zemax festgestellt.

3.4 Strahlseparationseinheit

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde die Strahlseparationseinheit für die bereits vorhandenen Einfachstreukanäle neu aufgebaut und justiert. Die Strahlengänge für die Mehrfachstreukanäle wurden entworfen und ebenfalls aufgebaut und justiert. Der Aufbau der Strahlseparationseinheit ist in Abb. 11 dargestellt. Dort sind die Nachweiskanäle mit der Wellenlänge bezeichnet, die sie detektieren. Eine Ausnahme bilden die Detektionskanäle für mehrfach gestreutes Licht 532m und 607m sowie die Polarisationskanäle 532v und 532h, die vertikal bzw. horizontal polarisiertes Licht detektieren. Im Folgenden werden die Nachweiskanäle nach diesem Schema bezeichnet.

3.4.1 Einfachstreukanäle

Das Licht im Strahlengang der Einfachstreukanäle wird zunächst durch ein achromatisches Linsensystem kollimiert. Anschließend durchläuft es eine Reihe von Strahlteilern und wird so nach Wellenlängenbereichen zerlegt. Weiterhin befindet sich in jedem Nachweiskanal ein Interferenzfilter, damit nur Licht der jeweils gewünschten Wellenlänge detektiert wird. Die Spezifikationen der Interferenzfilter, beispielsweise die genauen Zentralwellenlängen und Bandbreiten, sind in Ref. [22] angegeben. Dann durchläuft das Licht die Elemente der

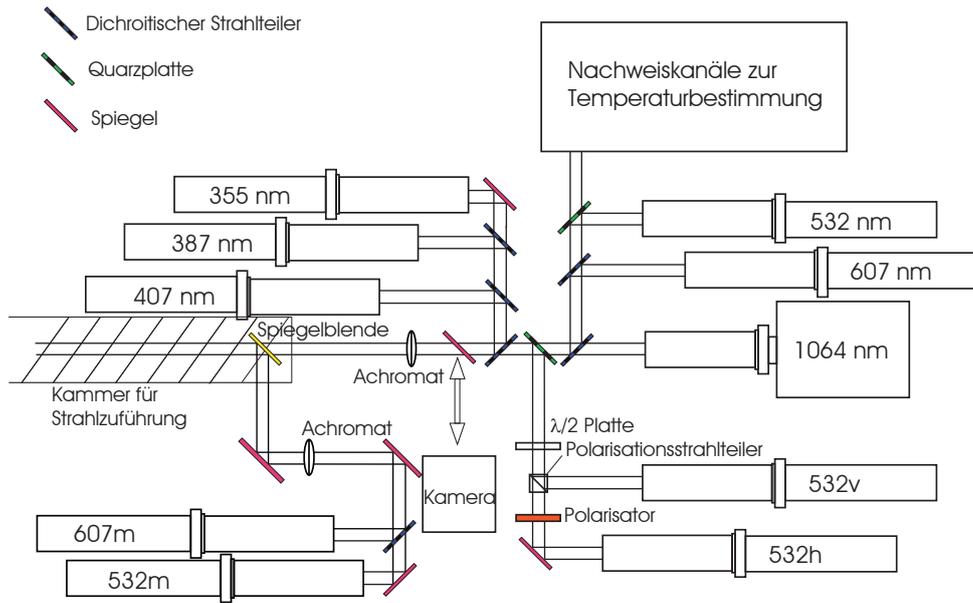


Abbildung 11: Aufbau der Strahlseparationseinheit mit anschließenden Photomultipliern. Die Photomultiplier der jeweiligen Kanäle wurden mit der Wellenlänge beschriftet, die sie detektieren. Eine Ausnahme bilden die Kanäle 532v, 532h, 532m und 607m. Der Doppelpfeil deutet an, dass der entsprechende Spiegel aus bzw. in den Strahlengang gefahren werden kann.

abbildenden Optik, die in Abschnitt 3.5 beschrieben wird. Die Interferenzfilter und die Elemente der abbildenden Optik sind in Photomultiplier-Vorsätzen gehalten. An diese schließen sich die PMTs zur Detektion des Lichts an. In Abb. 12 ist exemplarisch der Strahlengang des 532-nm-Kanals abgebildet.

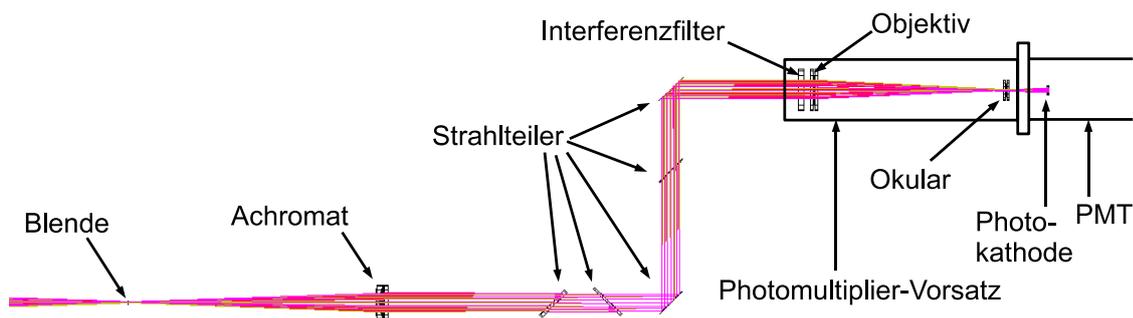


Abbildung 12: Exemplarische Veranschaulichung des Strahlengang des 532-nm-Kanals. Interferenzfilter, Objektiv und Okular befinden sich in einem Photomultiplier-Vorsatz.

Die Strahlengänge in den Nachweiskanälen für Einfachstreuung entsprechen weitgehend denen des früheren Aufbaus. Der vorgenommene Umbau war nötig, um die in Abschnitt 3.5 beschriebene optische Abbildung realisieren zu können.

Kollimator

Der Kollimator des bisherigen Empfängeraufbaus befindet sich in dem neuen Aufbau im Strahlengang der Einfachstreukanäle. Die Brennweite des Linsensystems (Carl Zeiss Jena) wurde von Grein zu 294 mm bestimmt [18]. Der Kollimator steht 320 mm hinter dem Fokus des Teleskops. Damit befindet sich der Fokus des Kollimators im Brennpunkt des in ca. 4 km Höhe zurückgestreuten Laserlichts. Das aus dieser Höhe zurückgestreute Licht wird deshalb sehr gut kollimiert. Für Licht aus größeren oder kleineren Rückstreuhöhen unterscheidet sich die Lage der Brennpunkte geringfügig. Deshalb ist dieses Licht nach dem Passieren des Kollimators leicht konvergent bzw. divergent.

Das den Achromat verlassende Licht muss sehr gut kollimiert sein, denn die im Strahlengang folgenden dichroitischen Spiegel und Interferenzfilter besitzen eine Winkelakzeptanz von nur wenigen Grad. Die Winkelabweichung der einfallenden Strahlen von der optischen Achse an den Strahlteilern und Interferenzfiltern wurde mit dem Strahlverfolgungsprogramm Zemax überprüft. In Zemax ist es möglich, Makros zu programmieren. Damit können auch komplexe Simulationen und Berechnungen durchgeführt werden. Es wurde ein Makro zur Berechnung des größten Einfallswinkels der auftreffenden Strahlen an einer beliebigen optischen Komponente programmiert. Das Makro simuliert den Weg einer vorgebbaren Anzahl von Strahlen. Dabei werden die Strahlen in einer anzugebenden Entfernung erzeugt und auf einen zufällig gewählten Punkt des Hauptspiegels gerichtet. Anschließend wird der Weg der Strahlen durch die Empfängeroptik simuliert. Diese Berechnungen ergaben, dass alle Winkelabweichungen kleiner als 0.6° sind.

Die optischen Elemente in der Strahlseparationseinheit haben einen Durchmesser von 2". Die Strahlteiler und dichroitischen Spiegel stehen unter einem Winkel von 45° im Strahlengang. Dadurch verringert sich der Durchmesser deren nutzbarer Fläche auf 36 mm. Damit ausreichend Toleranz zum Justieren der Elemente zur Verfügung steht, sollte der Strahldurchmesser in der Strahlseparationseinheit nicht mehr als 32 mm betragen. Abschattungen an Optiken der Strahlseparationseinheit aufgrund eines zu großen Strahldurchmessers würden dazu führen, dass das Gesichtsfeld nicht mehr allein durch die Feldblende bestimmt wird. Eine weitere Folge von Abschattungen wäre eine geringere Effizienz des Empfängers. Die mit Zemax bestimmten Strahldurchmesser liegen an jedem Strahlteiler oder Spiegel unter 32 mm.

Kamera

Die Ausrichtung des Laserstrahls kann mit einer CCD-Kamera (CCD für engl. charge-coupled devices) überprüft werden. Dafür kann etwa 110 mm hinter dem Achromaten ein Spiegel in den Strahlengang der Einfachstreukanäle gefahren werden. Dieser lenkt das kollimierte Licht auf ein Objektiv und die CCD-Kamera. Objektiv und Kamera sind so angeordnet, dass die Feldblende auf den Kamerachip abgebildet wird. Wie bereits in Abschnitt 3.3.3 ausgeführt wurde, befindet sich die Feldblende in der Bildweite des Empfangsteleskops für 4 km entfernte Objekte. Damit entsteht auf der Kamera ein scharfes Bild des Querschnitts des Laserstrahls in 4 km Höhe. Simulationen mit Zemax ergaben, dass mit diesem Bild bereits kleine Verkippungen des Laserstrahls gegenüber der optischen Achse des Teleskops feststellbar sind. Diese Verkippungen können durch das Ausrichten des Umlenkspiegels mittels zweier Schrittmotoren korrigiert werden.

Die Kamera wird durch den Laser getriggert. Dieser liefert einen 2V-Puls, der mit einem Verzögerungs- und Pulsgenerator DG535 von Stanford Research Systems Inc. ver-

zögert wird. Die Verzögerungszeit ist so gewählt, dass die Kamera Bilder vom Querschnitt des Laserstrahls in 4 km Höhe erzeugt.

Strahlteiler

In der Strahlseparationseinheit werden für die Aufteilung des Lichts in die einzelnen Nachweiskanäle dichroitische Spiegel und Quarzplatten verwendet. Dichroitische Spiegel dienen dazu, das Licht nach Wellenlängen zu zerlegen, indem Licht eines bestimmten Wellenlängenbereichs reflektiert und eines anderen transmittiert wird. In Ref. [22] sind die genauen Spezifikationen der einzelnen dichroitischen Spiegel mit Ausnahme des dichroitischen Spiegels zur Trennung von Licht der Wellenlängen 355 und 387 nm angegeben. Dieser dichroitische Spiegel wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit eingebaut. Im bisherigen Empfänger wurde mit Hilfe einer Quarzplatte das einfallende Licht auf diese beiden Kanäle nicht wellenlängenselektiv aufgespalten. Der neu eingesetzte Strahlteiler wurde von Barr Associates Inc. produziert. Sein Durchmesser beträgt 50.8 mm (2"). Der Anteil des durch den Strahlteiler transmittierten Lichts ist in Abhängigkeit von Wellenlänge und Polarisation in Tabelle 5 angegeben.

Tabelle 5: Transmission des dichroitischen Spiegels zur Trennung von Licht der Wellenlängen 355 und 387 nm in Abhängigkeit von Wellenlänge und Polarisation. Die Polarisationsrichtung ist relativ zur Einfallsebene am dichroitischen Spiegel angegeben.

Wellenlänge	Polarisation	Transmission
355 nm	\perp	98%
355 nm	\parallel	99%
387 nm	\perp	0%
387 nm	\parallel	1%

Das Licht für die beiden Polarisationskanäle 532v und 532h wird mit einer Quarzplatte ausgekoppelt. Diese reflektiert einen Anteil des auftreffenden Lichts und transmittiert den Großteil, unabhängig von der Wellenlänge. Da der bei Transmission der Quarzplatte folgende 532-nm-Kanal sowie die Nachweiskanäle zur Temperaturbestimmung ebenfalls Licht der Wellenlänge 532 nm detektieren, kann hier nicht dichroitisch getrennt werden.

Elemente in den Polarisationskanälen

Im Strahlengang der Polarisationskanäle 532v und 532h steht eine $\lambda/2$ -Platte, die zur Kalibrierung der Kanäle benötigt wird. Anschließend läuft das Licht durch einen Polarisationsstrahlteilerwürfel. Dieser transmittiert das horizontal polarisierte Licht und reflektiert das vertikal polarisierte Licht. Das transmittierte Licht enthält nach Durchlaufen des Polarisationsstrahlteilers noch einen Teil vertikal polarisierten Lichts. Deshalb durchläuft es anschließend einen entsprechend ausgerichteten Linearpolarisator.

3.4.2 Mehrfachstreukanäle

Der Strahlengang der Mehrfachstreukanäle entspricht prinzipiell dem der Einfachstreukanäle: Das einfallende Licht wird kollimiert, mit einem dichroitischen Strahlteiler in die beiden

Nachweiskanäle aufgespalten, durchläuft Interferenzfilter und abbildende Optik und wird mit Hilfe von PMTs detektiert. Die Abb. 13 zeigt den Strahlverlauf in den Mehrfachstreu-kanälen bei der Benutzung eines Gesichtsfelds von 3.8 mrad.

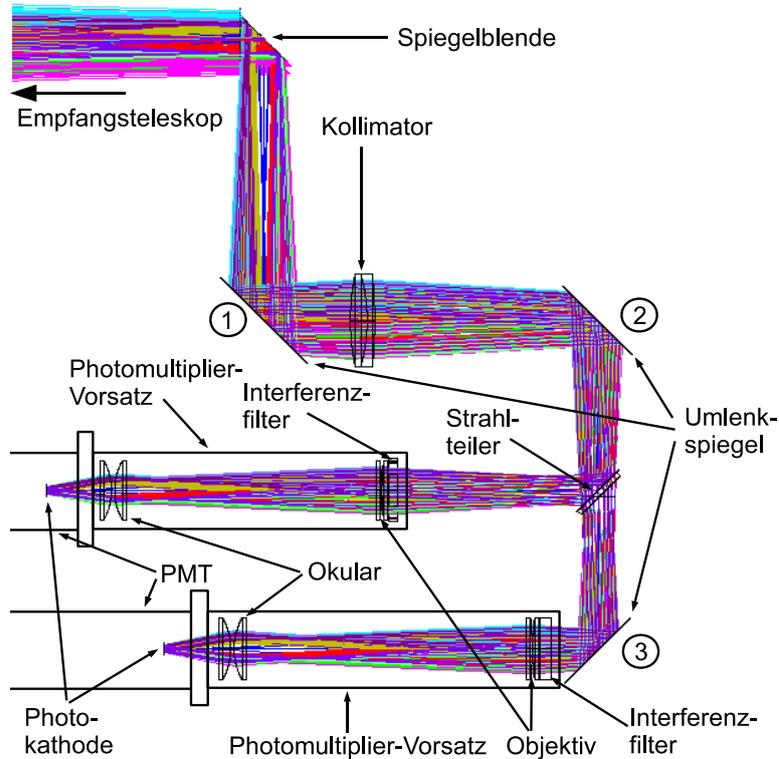


Abbildung 13: Strahlengang in den Kanälen zur Detektion von mehrfach gestreutem Licht. Der Strahlverlauf entspricht dem im Empfänger bei der Nutzung eines Gesichtsfelds von 3.8 mrad. Die Umlenkspiegel sind nummeriert. Strahlen unterschiedlicher Farben kommen aus unterschiedlichen Bereichen des Empfängergesichtsfelds.

Der wesentliche Unterschied zum Strahlengang in den Einfachstreukanälen besteht hier in den deutlich größeren Gesichtsfeldern, die in den Mehrfachstreukanälen verwendet werden. Wie schon in Abschnitt 3.3.1 ausgeführt, kann mit Gesichtsfeldern von 0.78, 2.0 oder 3.8 mrad gemessen werden. Damit sind die Gesichtsfelder um den Faktor drei bis fünf größer als in den Einfachstreukanälen. Da ein größeres Gesichtsfeld zu einer größeren Divergenz der Lichtstrahlen hinter der Blende führt, ist der Strahldurchmesser im Mehrfachstreukanal deutlich größer als im Einfachstreukanal.

Es ist günstig mit möglichst kleinen Strahldurchmessern zu arbeiten. Zum einen ist der Platz im Empfänger des Lidars sehr beschränkt. Zum anderen steigen die Preise optischer Komponenten mit deren Größe stark an. Der Durchmesser des kollimierten Strahls wird vor allem durch die Brennweite des Kollimators f_K festgelegt. Bilden das Empfangsteleskop und der Kollimator ein afokales System, ergibt sich der Durchmesser des kollimierten Strahls d_K nach dem Strahlensatz zu

$$d_K = \frac{d_T f_K}{f_T}. \quad (24)$$

Dabei ist d_T der Strahldurchmesser des auf das Teleskop treffenden Lichts, also der Durchmesser des Hauptspiegels, und f_T die effektive Brennweite des Teleskops. Stimmen die Brennpunkte von Teleskop und Kollimator nicht genau überein, kann das Verhalten des Strahldurchmessers dennoch mit Gleichung (24) genähert werden. In Abb. 14 ist die Verkleinerung des Strahldurchmessers durch ein afokales System dargestellt. Der Strahldurchmesser kann nicht beliebig klein gemacht werden, da die Qualität der optischen Abbildung, die in Abschnitt 3.5 beschrieben ist, ebenfalls von der Kollimatorbrennweite beeinflusst wird. Es wird mit einem Kollimator der Brennweite von 300 mm gearbeitet. In der realisierten Konfiguration hat das Strahlenbündel seinen größten Durchmesser am Kollimator. Dieser ist in Tabelle 6 in Abhängigkeit vom verwendeten Gesichtsfeld angegeben.

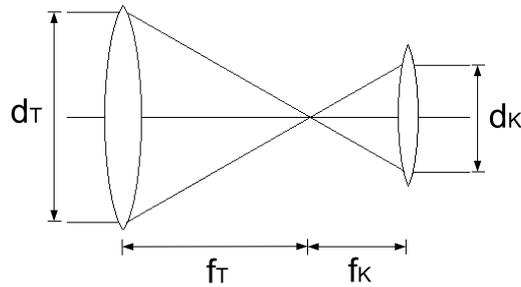


Abbildung 14: Verringerung des Strahldurchmessers von d_T auf d_K durch ein afokales System mit den Brennweiten f_T und f_K .

Eine weitere Zielstellung beim Entwurf des Strahlengangs der Mehrfachstreukanäle war, dass die Einfallswinkel auf dem dichroitischen Spiegel und den Interferenzfiltern möglichst wenig um 45° bzw. 0° streuen sollen, damit die entsprechenden Akzeptanzwinkel eingehalten werden. Liegen einige rückgestreute Strahlen außerhalb dieser Akzeptanzbereiche, werden diese durch das jeweilige Element stärker geschwächt als Strahlen mit kleineren Einfallswinkeln. Die Folge davon wäre eine winkelabhängige Systemfunktion $K(\lambda_i)$ in der Lidargleichung. Die großen Gesichtsfelder und die damit verbundenen breiten Winkelverteilungen der einfallenden Strahlen erschwerten die Erzeugung eines gut kollimierten Strahlenbündels. Für verschiedene Konfigurationen wurden die Einfallswinkel mit dem Strahlverfolgungsprogramm Zemax, bei Nutzung des in Abschnitt 3.4.1 beschriebenen Makros, berechnet. Neben der Kollimatorbrennweite bestimmt vor allem der Abstand zwischen dem Kollimator und dem Brennpunkt des Teleskops die Größe der Einfallswinkel. Im realisierten Aufbau beträgt der Abstand zwischen dem Fokus des Teleskops und dem Achromaten 320 mm. Bei der gegebenen Kollimatorbrennweite sind in dieser Konfiguration die Einfallswinkel minimal. Die größten Einfallswinkel in den realisierten Strahlengängen sind in Abhängigkeit vom Gesichtsfeld in Tabelle 6 angegeben. Dort sind außerdem vergleichend die Einfallswinkel in den Einfachstreukanälen mit aufgeführt.

Der verwendete Kollimator ist ein achromatisches Linsensystem, das von Edmund Optics hergestellt wurde. Dieses besteht aus zwei Einzellinsen aus den Gläsern SF5 und BK7. Die Oberflächen haben eine Antireflexschicht aus Magnesiumfluorid, die im Wellenlängenbereich von 450 bis 800 nm die Reflektivität der Grenzfläche auf unter 2% reduziert. Weitere Angaben zum Kollimator sind in Tabelle 7 aufgeführt. Der Kollimator ist in einer Dreipunkthalterung gefasst, die die freie Apertur nicht verkleinert.

Tabelle 6: Daten des Strahlengangs der Mehrfachstreukanäle. Zum Vergleich sind die Daten der Einfachstreukanäle mit aufgeführt.

Parameter	Mehrfachstreukanäle FOV 3.8 mrad	Mehrfachstreukanäle FOV 2.0 mrad	Einfachstreukanäle FOV 0.5 mrad
maximaler Strahldurchmesser	64.5 mm	46 mm	32 mm
größter Einfallswinkel	3.4°	1.9°	0.6°

Tabelle 7: Daten der Kollimatoren in den Strahlengängen der Mehrfach- und Einfachstreukanäle.

Parameter	Kollimator der Mehrfachstreukanäle	Kollimator der Einfachstreukanäle
Brennweite	300 mm	294 mm
Durchmesser	75 mm	50 mm
freie Apertur in Halterung	73.5 mm	46 mm
Hersteller	Edmund Optics	Carl-Zeiss-Jena
Bezeichnung	NT45-418	-

Da im Empfänger des Lidars der zur Verfügung stehende Platz nicht sehr groß war, musste der Strahlengang in den Mehrfachstreukanälen durch insgesamt drei Spiegel umgelenkt werden. Deren Substrate haben eine Oberflächengüte³ von $\lambda/4$. Weitere Angaben zu den Spiegeln sind in Tabelle 8 zu finden. Die Substratdurchmesser wurden so gewählt, dass an jedem Spiegel mindestens 4 mm Justiertoleranz sind und andererseits die Spiegel nicht unnötig viel Platz im Empfänger einnehmen. Alle Substrate wurden von der Laseroptik GmbH mit einer dielektrischen Schicht versehen, die im Wellenlängenbereich von 530 bis 630 nm hochreflektierend wirkt. Die Spiegel sind durch Dreipunkthalterungen gefasst, wodurch deren freie Apertur nicht verkleinert wird. Die Daten der Umlenkspiegel sind in Tabelle 8 zusammengefasst.

Tabelle 8: Daten der Umlenkspiegel in den Mehrfachstreukanälen. Die Spiegel sind entsprechend Abb. 13 nummeriert.

Spiegel	1	2	3
Durchmesser	101.6 mm	80.0 mm	76.2 mm
Hersteller	Edmund Optics	Bernhard Halle	Edmund Optics
Material	Quarzglas	Duranglas	Quarzglas

Der dichroitische Strahlteiler reflektiert Licht der Wellenlänge von 607 nm und trans-

³Die Stärke der Abweichung einer Oberfläche von einer exakt planen Referenzfläche wird üblicherweise in Bruchteilen der Wellenlänge des Lichts, das zur Untersuchung der Oberflächengüte verwendet wurde, angegeben. Je kleiner der Bruchteil ist, desto höher ist die Oberflächengüte. Weitere Informationen zur Art der Untersuchung der Oberflächengüte lassen sich z.B. Ref. [23] entnehmen.

mittiert Licht mit einer Wellenlänge von 532 nm. Dabei beträgt der Anteil des transmittierten Lichts bei 532 nm ca. 90% und bei 607 nm ca. 2%. Der Strahlteiler hat einen Durchmesser von 50.8 mm (2") und wurde von L.O.T.-Oriol produziert.

Der Interferenzfilter des Nachweiskanals 607 nm hat eine Zentralwellenlänge von 607.3 nm und eine Bandbreite von 3 nm. Der Interferenzfilter bei einer Zentralwellenlänge von 532.5 nm besitzt eine Bandbreite von 5 nm. Es wurden relativ große Bandbreiten gewählt, da die Winkelakzeptanz von Interferenzfiltern mit deren Bandbreite zunimmt. Die Durchmesser der Interferenzfilter betragen 50.8 mm (2").

3.5 Optische Abbildung im Empfänger

Der Durchmesser der Hauptspiegels des Empfangsteleskops beträgt 800 mm. Die Photokathoden haben einen Durchmesser von nur ca. 7 mm. Damit muss die Empfängeroptik den Durchmesser des auf das Teleskop treffenden Strahlenbündels von 800 mm auf unter 7 mm verringern. Die Verkleinerung des Strahldurchmessers geschieht dabei in zwei Schritten. Zunächst wird durch das System von Teleskop und Kollimator der Strahldurchmesser verringert. Dies wurde bereits im Abschnitt 3.4 beschrieben. Weitere Empfängeroptiken, hier ein System aus Objektiv- und Okularlinsen, verkleinern dann den Strahldurchmesser auf die notwendige Größe. Das Prinzip dieser Empfängeroptiken wurde im neuen Aufbau des Ramanlidars MARTHA grundlegend verändert und soll deshalb hier erläutert werden. Dazu führt der Abschnitt 3.5.1 in diese Thematik ein und erläutert dabei auftretende Probleme. Daraus werden in Abschnitt 3.5.2 Forderungen an die optische Abbildung abgeleitet. Weiter wird erläutert, wie diese mit Hilfe einer geeigneten optischen Abbildung erfüllt werden konnten. Dann wird die konkrete Realisierung der beschriebenen Abbildung erläutert, insbesondere bzgl. der verwendeten Linsen. Abschließend wird in Abschnitt 3.5.4 erklärt, wie die realisierte Abbildung vor dem Aufbau simuliert und nach dem Aufbau überprüft wurde.

3.5.1 Problemstellung und Motivation der neuen optischen Abbildung

In Abb. 15 ist ein Strahlengang dargestellt, der in Empfängeraufbauten in der Lidartechnik oft realisiert wird. Nach dem Teleskop folgt ein Kollimator. Eine Detektorlinse bündelt schließlich das Licht auf eine Photokathode.

Im Ramanlidar MARTHA werden unterschiedliche PMTs benutzt. Für die Detektionskanäle von Mehrfachstreuung und den Kanal 532v werden PMTs von Hamamatsu vom Typ R7400 verwendet. Deren Photokathoden haben einen Durchmesser von 8 mm. Für den 1064-nm-Kanal wird der wassergekühlte PMT R3236 von *electron tubes* genutzt. Dessen Kathode hat einen Durchmesser von 10 mm. In den übrigen Kanälen werden PMTs vom Typ 9893/350 von *electron tubes* mit einem Kathodendurchmesser von 9 mm verwendet. Da jedoch die Sensitivität der Kathoden zum Rand hin stark abfällt, ist die nutzbare Fläche der Photomultiplier in der Regel etwas kleiner als deren Photokathode. Es wird davon ausgegangen, dass der effektive Durchmesser der Photokathoden der Typen 9893/350 und R7400 nicht mehr als 7 mm beträgt und beim Typ R3236 geringfügig größer ist. Da es jedoch keine absolute Sicherheit zu diesen Angaben gibt, ist es günstig, die Strahldurchmesser auf den Photokathoden möglichst klein zu halten.

Die Sensitivität der Photokathoden ist jedoch nicht nur am Rand inhomogen. In Ref. [24] ist gezeigt, dass bei dem PMT 5600 von Hamamatsu große Inhomogenitäten auf der gesamten Photokathode zu finden sind. Es kann angenommen werden, dass bei den im

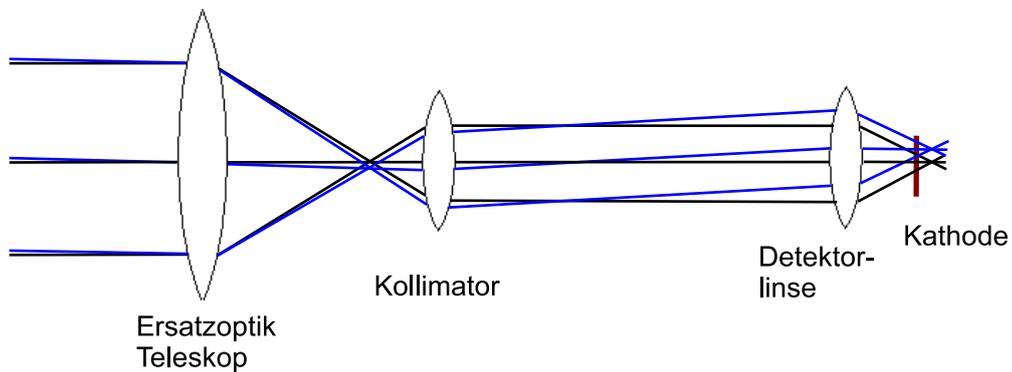


Abbildung 15: Oft verwendetes Prinzip für den Strahlengang im Empfänger eines Lidars: Das vom Teleskop kommende Licht wird zunächst kollimiert und anschließend durch eine Detektorlinse auf die Photokathode gebündelt. Anstelle des Teleskops ist eine Sammellinse als Ersatzoptik dargestellt.

Ramanlidar MARTHA verwendeten PMTs, insbesondere beim Typ R7400, die Photokathoden ein ähnliches Verhalten zeigen.

Das Ramanlidar detektiert zurückgestreutes Licht aus einem großen Höhenbereich von ca. 1 bis 60 km. Das Licht aus verschiedenen Rückstreuhöhen trifft mit unterschiedlichen Verteilungen von Einfallswinkeln auf das Teleskop. In dem in Abb. 15 dargestellten Empfänger Aufbau pflanzen sich diese Winkel bis zur Photokathode fort und bewirken eine Variation des Strahldurchmessers auf der Photokathode mit der Höhe des Rückstreuorts. Dies führt bei einer nicht homogen sensitiven Photokathode zu einer Verfälschung des Lidarsignals [25]. Die Abhängigkeit der Ausleuchtung der Fläche vom Einfallswinkel ist gut in Abb. 16 zu erkennen, wo der Strahlengang von Detektorlinse bis Photokathode vergrößert dargestellt ist.

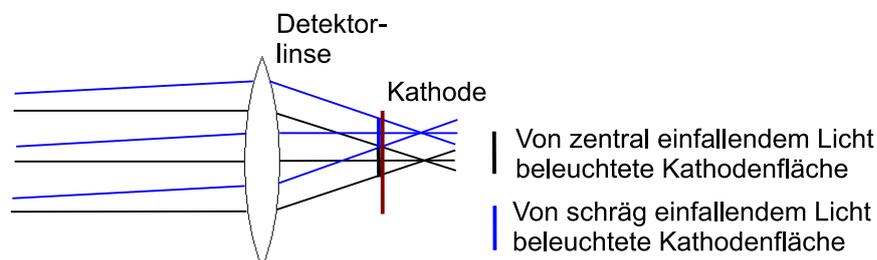


Abbildung 16: Vergrößerung des Strahlengangs vor der Kathode eines Photomultipliers. Es sind Strahlen mit unterschiedlichen Einfallswinkeln gezeigt, die unterschiedliche Flächen auf der Photokathode beleuchten.

3.5.2 Optische Abbildung im Ramanlidar MARTHA

Aus Abschnitt 3.5.1 lassen sich zwei Forderungen an die abbildende Optik im Empfänger des Ramanlidars MARTHA stellen:

1. Die Strahldurchmesser auf den Photokathoden dürfen nicht von der Höhe der Rückstreuung abhängig sein.
2. Die Strahldurchmesser dürfen auf den Photokathoden nicht größer als 7 mm sein. Es sollen möglichst kleine Strahldurchmesser auf den Kathoden realisiert werden.

Abb. 17 zeigt schematisch den idealisierten Strahlengang, wie er im Empfänger des Ramanlidars realisiert wurde. Die Unabhängigkeit des Strahldurchmessers auf der Photokathode von der Höhe des Rückstreuorts wird erreicht, indem die Empfängeroptik den Primärspiegel auf die Photokathode abbildet. Bei dieser optischen Abbildung kann man sich den Primärspiegel als Objekt vorstellen, das vom zurückgestreuten Licht aus der Atmosphäre beleuchtet wird. Für eine feste Gegenstandsweite und -größe ist die Bildgröße, also der Strahldurchmesser auf der Photokathode, immer gleich und natürlich unabhängig von der Entfernung und Position der Lichtquelle, also der Rückstrehöhe. Mit diesem Aufbau wird damit erreicht, dass die Lidarsignale unempfindlich gegenüber Inhomogenitäten der Photokathoden sind.

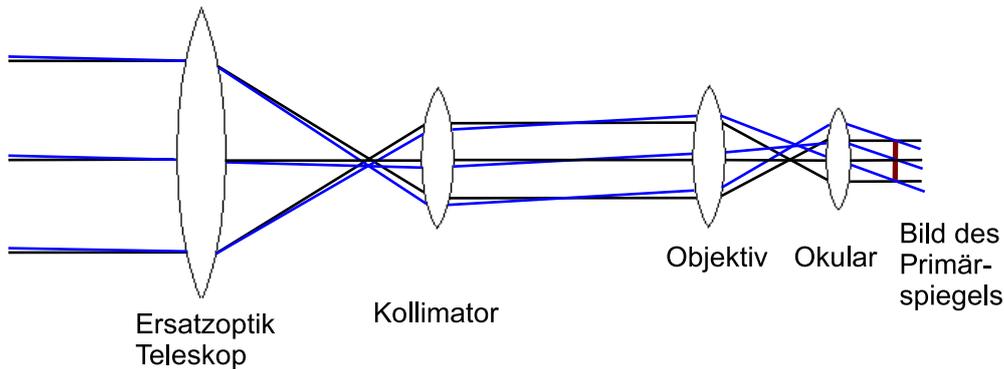


Abbildung 17: Strahlengang im Empfänger des IFT-Ramanlidars MARTHA. Anstatt der Detektorlinse wird hier ein afokales optisches System bestehend aus Objektiv und Okular verwendet. Das Teleskop wird durch eine Sammellinse als Ersatzoptik dargestellt.

Bei der Abbildung des Primärspiegels auf die Photokathode durch einen Kollimator und eine Detektorlinse, wie in Abb. 15 dargestellt, ist in der Konfiguration des Ramanlidars MARTHA der Strahldurchmesser auf der jeweiligen Photokathode deutlich größer als 7 mm. Bei der Verwendung eines Okulars, wie in Abb. 17 dargestellt und in Ref. [25] vorgeschlagen, kann der Strahldurchmesser auf der Kathode jedoch unter 7 mm gebracht werden. Falls Objektiv und Okular ein afokales System bilden, wie in Abb. 17 dargestellt, ergibt sich bei parallelem Lichteinfall der Strahldurchmesser auf der Photokathode nach dem Strahlensatz zu

$$d_{Ok} = \frac{d_{Ob} f_{Ok}}{f_{Ob}}. \quad (25)$$

Dabei sind f_{Ob} und f_{Ok} die Objektiv- bzw. Okularbrennweiten und d_{Ob} und d_{Ok} die Durchmesser des Strahlenbündels vor Passieren des Objektivs bzw. hinter dem Okular. Obwohl im realisierten Aufbau kein afokales System realisiert wurde, lässt sich an Gleichung (25) das grundsätzliche Verhalten des Strahldurchmessers an der Photokathode bei Veränderung der Brennweiten von Objektiv und Okular erklären: Eine kürzere Brennweite des Okulars sowie eine größere Brennweite des Objektivs verkleinern den Strahldurchmesser auf der Photokathode.

Mit den gegebenen Rahmenbedingungen konnten die Brennweiten von Objektiv und Okular nicht beliebig groß bzw. klein gemacht werden. Dadurch konnte der Strahldurchmesser auf der Photokathode nur begrenzt verringert werden. Die Ursache davon war zum einen die Einhaltung eines Mindestabstands zwischen Okular und Photokathode. Dieser resultiert überwiegend aus der Dicke einer Schutzklappe, die sich zwischen Photomultiplier-Vorsatz und PMT befindet. Außerdem liegen die Kathoden der Photomultiplier einige Millimeter hinter der Vorderseite der PMTs. Damit beträgt beim PMT vom Typ 9893/350 der minimale Abstand zwischen Okular und Photokathode 38 mm. Beim Typ R7400 ist ein Mindestabstand von 42 mm erforderlich. Dies bedingt Okularbrennweiten von mindestens 50 mm. Kleinere Brennweiten f_{Ok} würden bei konstanter Gegenstandsweite g nach Gleichung (22) zu kleineren Bildweiten b , also kleineren Abständen zwischen Okular und Photokathode, führen. Die gewählten Okularbrennweiten sind in den Tabellen 9 und 10 angegeben.

Tabelle 9: Parameter der Detektionskanäle für Einfachstreuung.

Kanal	355 nm	387 nm	407 nm	1064 nm
Abstand Achromat–Objektiv/ mm	598.8	558.0	587.0	509.5
Abstand Objektiv–Okular/ mm	225	225	225	195
Brennweiten Objektivlinsen/ mm	1000; 300	1000; 300	1000; 300	750
Gesamtbrennweite Objektiv/ mm	230	230	230	750
Brennweiten Okularlinsen/ mm	100; 125	125; 125	100; 100	150; 150
Gesamtbrennweite Okular/ mm	56	63	50	75
Strahldurchmesser an Objektiv/ mm	26.4	26.1	26.3	25.3
Strahldurchmesser an Kathode/ mm	6.2	6.2	5.7	6.7

Kanal	532 nm	532h	532v	607 nm
Abstand Achromat–Objektiv/ mm	771.5	821.5	739.5	753.5
Abstand Objektiv–Okular/ mm	220	210	210	220
Brennweiten Objektivlinsen/ mm	1000; 300	1000; 300	1000; 300	1000; 300
Gesamtbrennweite Objektiv/ mm	230	230	230	230
Brennweiten Okularlinsen/ mm	125; 125	125; 125	125; 125	125; 125
Gesamtbrennweite Okular/ mm	63	63	63	63
Strahldurchmesser an Objektiv/ mm	28.6	28.7	28.1	28.1
Strahldurchmesser an Kathode/ mm	5.9	5.7	6.0	5.9

Zum anderen darf der Abstand zwischen Objektiv und Okular nicht größer als 225 mm sein, da der Platz im Empfängeraufbau beschränkt ist. Die Summe der Brennweiten von Objektiv und Okular sollte nicht viel größer als dieser Wert sein, damit ein Strahlengang

Tabelle 10: Parameter der Detektionskanäle für Mehrfachstreuung.

Kanal	532m	607m
Abstand Achromat–Objektiv/ mm	497.6	495.6
Abstand Objektiv–Okular/ mm	227.0	227.0
Brennweiten Objektivlinsen/ mm	400; 400	400; 400
Gesamtbrennweite Objektiv/ mm	200	200
Brennweiten Okularlinsen/ mm	100; 100	100; 100
Gesamtbrennweite Okular/ mm	50	50

realisiert werden kann, der sich nicht grundlegend von dem Strahlengang eines afokalen Systems unterscheidet. Mit Ausnahme des Nachweiskanals für 1064 nm betragen die Objektivbrennweiten 200 oder 230 mm (siehe Tabellen 9 und 10).

Trotz dieser Beschränkungen wird, mit Ausnahme des Nachweiskanals für 1064 nm, in den Nachweiskanälen für Einfachstreuung der Strahldurchmesser an den Photokathoden auf ca. 6 mm verringert (siehe Tabelle 9). In den Nachweiskanälen für Mehrfachstreuung überschreitet der Strahldurchmesser an den Photokathoden teilweise 7 mm (siehe Tabelle 11). Dies wird in Abschnitt 6.1 diskutiert.

Tabelle 11: Strahldurchmesser an Objektiv und Photokathode in den Kanälen zur Detektion von Mehrfachstreuung in Abhängigkeit vom Gesichtsfeld.

Kanal	532m	532m	607m	607m
Gesichtsfeld	2.0 mrad	3.8 mrad	2.0 mrad	3.8 mrad
Strahldurchmesser am Objektiv/ mm	33.9	42.4	33.9	42.5
Strahldurchmesser an Kathode/ mm	6.7	7.2	6.7	7.6

Der Aufbau des Nachweiskanals 1064 nm unterscheidet sich von dem der anderen Kanäle. Die Ursache ist das deutlich größere Gehäuse des Photomultipliers aufgrund der Wasserkühlung – die übrigen Kanäle werden nicht aktiv gekühlt. Zum einen nimmt das Kühlgehäuse viel Platz ein. Dadurch ist der Abstand zwischen Objektiv und Okular auf ca. 200 mm beschränkt. Zum anderen ist aufgrund des Kühlgehäuses ein größerer Abstand zwischen Okular und Photokathode nötig. Unter anderem befindet sich ein 40 mm dickes Vakuumfenster zwischen Okular und Kathode. Im 1064-nm-Kanal beträgt der Abstand zwischen Okular und Kathode 91 mm. Dementsprechend hat das Okular hier eine größere Brennweite als in den anderen Nachweiskanälen. Außerdem wurde ein Objektiv gewählt, was deutlich schwächer ist als die Objektive in den übrigen Nachweiskanälen. Die realisierte optische Abbildung unterscheidet sich damit deutlich von einem afokalen System. Es war jedoch möglich, das System so zu optimieren, dass der Strahldurchmesser auf der Photokathode auf 6.7 mm verringert wird. Abb. 18 zeigt vergleichend die Strahlengänge ab dem Interferenzfilter über Objektiv und Okular bis zur Photokathode in den Kanälen 532 nm und 1064 nm. Die Unterschiede im Strahlengang sind deutlich zu erkennen.

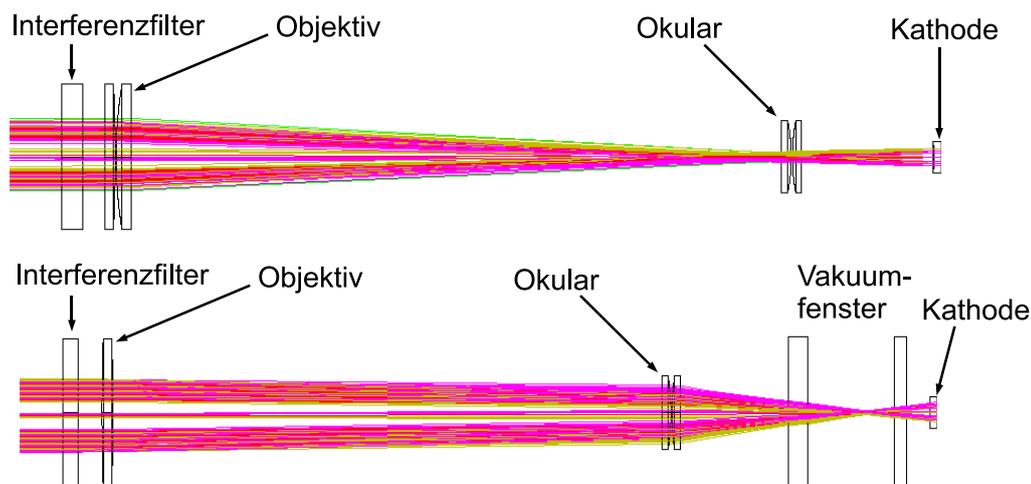


Abbildung 18: Vergleichende Darstellung der Strahlengänge in den Nachweiskanälen 532 nm (oben) und 1064 nm (unten) von Interferenzfilter bis Photokathode.

3.5.3 Realisierung der entworfenen optischen Abbildung

In den realisierten Strahlengängen besteht das Objektiv meist aus zwei Sammellinsen, im Fall des 1064-nm-Kanals aufgrund der deutlich größeren Objektivbrennweite (siehe Tabelle 9) aus nur einer Sammellinse. Die Durchmesser der Linsen betragen 50.8 mm (2"). Das Okular besteht aus zwei Sammellinsen. Diese Linsen besitzen in den Einfachstreukanälen einen Durchmesser von 25.4 mm (1"). Aufgrund des größeren Strahldurchmessers in den Mehrfachstreukanälen werden dort Linsen mit einem Durchmesser von 2" als Okular verwendet. Die Nutzung von einer Kombination zweier Linsen hat den Vorteil, dass so die Gesamtbrennweite des Linsensystems in feinen Abstufungen gemäß

$$\frac{1}{f_{ges}} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} \quad (26)$$

wählbar ist, denn die Auswahl der Brennweiten von Standardlinsen ist auf einige Werte beschränkt. Die Linsen wurden von Thorlabs bezogen. Die Linsen der Nachweiskanäle 355 nm und 387 nm bestehen aus Quarzglas, die übrigen aus BK7-Glas. Alle Linsen sind mit einer zur jeweiligen Wellenlänge passenden Standard-Antireflexbeschichtung versehen. Mit Ausnahme der Objektivlinse für den 1064-nm-Kanal, die eine bispärische Linse ist, sind alle anderen Objektiv- und Okularlinsen plan-konvexe Linsen. Die gekrümmten Flächen von jeweils zwei kombinierten Linsen liegen sich direkt gegenüber. Durch diese Anordnung werden Abberationen minimiert. Die Brennweiten der einzelnen Objektiv- und Okularlinsen sowie die daraus resultierenden Gesamtbrennweiten sind in den Tabellen 9 und 10 aufgelistet.

Die Objektiv- und Okularlinsen sowie die Interferenzfilter sind in Photomultiplier-Vorsätzen gehaltert. Das sind 270 mm bzw. im 1064-nm-Kanal 230 mm lange Röhren. Diese besitzen ein Innengewinde damit optische Elemente mittels Halteringen zentrisch eingeschraubt werden können. Aufgrund des flachen Anstiegs des Gewindes können die Abstände zwischen Objektiv und Okular sowie Okular und Photokathode auf 0.1 mm genau

eingestellt werden. Dadurch lässt sich der in Zemax simulierte Aufbau sehr exakt realisieren. Weiterhin erreicht man, dass es zu keinen Verkippungen der gehaltenen Elemente kommt. Die PMTs sind an den Photomultiplier-Vorsätzen lichtdicht befestigt, damit kein Streulicht detektiert wird.

3.5.4 Simulation und Überprüfung der Nachweiskanäle

Die Strahlengänge aller Nachweiskanäle wurden mit der Optiksoftware Zemax entworfen und simuliert. Dabei wurde zunächst die Abbildung eines Objekts, das sich an der Position des Hauptspiegels befindet, auf die Photokathoden simuliert. Die Größe des Objekts stimmte mit dem Durchmesser des Hauptspiegels von 800 mm überein. Die Qualität der Abbildung wurde durch die Variation der Brennweiten von Objektiv- und Okularlinsen und der Abstände zwischen Kollimator und Objektiv sowie zwischen Objektiv und Okular optimiert. In den Detektionskanälen für mehrfach gestreutes Licht stellte die Wahl der Kollimatorbrennweite einen zusätzlichen Freiheitsgrad dar. Dabei wurde u.a. die automatische Optimierungsfunktion von Zemax benutzt. Für verschiedene Kombinationen der Brennweiten von Kollimator, Objektiv und Okular wurden von Zemax die Abstände zwischen diesen Elementen und der Photokathode so optimiert, dass die Anordnung die beste optische Abbildung mit diesen Elementen ergab. Für die Optimierung wurden Randbedingungen vorgegeben, z.B. ein maximaler Strahldurchmesser auf der Photokathode oder ein Mindestabstand zwischen Okular und Photokathode.

In den Konfigurationen, deren optische Abbildungen die beste Qualität hatten, wurde anschließend mit Hilfe des Strahlverfolgungsprogramms Zemax das tatsächliche Verhalten der Empfängeroptik bei der Detektion von in der Atmosphäre zurückgestreutem Licht überprüft. Dafür wurden die Objektpunkte, die die Ausgangspunkte für die simulierten Strahlen sind, auf die Position möglicher Rückstreuorte in Höhen zwischen 0.5 und 60 km gesetzt. Bei der Simulation der Einfachstreukanäle wurden die Objektpunkte entsprechend der Ausdehnung des ausgesandten Laserstrahls in der jeweiligen Höhe verteilt. Bei der Untersuchung der Mehrfachstreukanäle wurden die Objektpunkte über die Ausdehnung des gesamten Empfängergesichtsfelds verteilt. Es wurde untersucht, ob der Strahldurchmesser auf den Photokathoden für alle Rückstreuhöhen gleich ist, wie sich Strahlen aus verschiedenen Bereichen des Gesichtsfelds verhalten und ob die Strahldurchmesser auf den einzelnen Photokathoden die geforderte Größe besitzen. Die Ergebnisse der Untersuchung der Abhängigkeit des Strahldurchmessers auf den Photokathoden von der Höhe des Rückstreuorts sind in Tabelle 12 angegeben. Der Versatz der Strahlen auf der Photokathode zwischen in der Mitte und am Rand des Laserstrahls bzw. Gesichtsfelds zurückgestreuten Laserlichts ist für die einzelnen Kanäle in Tabelle 13 aufgeführt.

Nach Aufbau und Justierung der Nachweiskanäle wurde die optische Abbildung überprüft. Dazu wurde bei noch nicht montierten Photomultipliern und Interferenzfiltern ein Schirm an die Photomultiplier-Vorsätze befestigt. Der Schirm befand sich in dem Abstand zum hinteren Ende des Photomultiplier-Vorsatzes, in dem sich die Photokathode des montierten PMT befinden würde. Der Abstand zwischen Vorsatz und Schirm konnte auf ca. 1 mm genau eingestellt werden. Bei Einfall von Tageslicht auf das Teleskop waren bei allen Kanälen eine scharf kreisrund beleuchtete Fläche auf dem Schirm zu erkennen. Abschattungen am Teleskop wurden scharf abgebildet. Der Durchmesser der beleuchteten Fläche konnte mit einer Unsicherheit von ca. 1 mm bestimmt werden und stimmte im Rahmen der Messgenauigkeit mit den simulierten Ergebnissen überein.

Tabelle 12: Variation des Strahldurchmessers bei unterschiedlichen Rückstreuöhöhen zwischen 1 und 60 km. Die Daten wurden durch Simulationen mit Zemax erhalten.

Kanal	Differenz größter–kleinster Strahldurchmesser
Kanäle zur Detektion von Einfachstreuung	<0.2 mm
Kanäle zur Detektion von Mehrfachstreuung bei $FOV = 2.0$ mrad	<0.02 mm
Kanäle zur Detektion von Mehrfachstreuung bei $FOV = 3.8$ mrad	<0.3 mm

Tabelle 13: Versatz der Strahlenbündel auf den Photokathoden zwischen in der Mitte und am Rand des Laserstrahls bzw. Gesichtsfelds zurückgestreuten Laserlichts.

Kanal	Versatz der Strahlenbündel
Kanäle zur Detektion von einfach gestreutem Licht	
355 nm	<0.02 mm
387 nm	<0.02 mm
407 nm	<0.02 mm
532 nm	<0.02 mm
532h	<0.02 mm
532v	<0.02 mm
607 nm	<0.02 mm
1064 nm	<0.04 mm
Kanäle zur Detektion von mehrfach gestreutem Licht	
532m bei $FOV = 2.0$ mrad	≈ 0.1 mm
607m bei $FOV = 2.0$ mrad	≈ 0.1 mm
532m bei $FOV = 3.8$ mrad	≈ 0.4 mm
607m bei $FOV = 3.8$ mrad	≈ 0.4 mm

4 Qualitätstests

Nach den beschriebenen Umbauarbeiten am Ramanlidar MARTHA wurde dessen Qualität durch Tests und Simulationen überprüft. Der in Abschnitt 4.1 beschriebene Telecover-Test bildet dabei den Schwerpunkt mit vielfältigen Aussagen zur Qualität des Empfängers. In Abschnitt 4.2 wird erklärt wie untersucht wurde, ob die Verwendung einer Spiegelblende die Lidarsignale verfälscht. Aussagen zu den Akzeptanzwinkeln des dichroitischen Strahlteilers und der Interferenzfilter in den Mehrfachstreukanälen werden in Abschnitt 4.3 erläutert.

4.1 Telecover-Test

Der sogenannte Telecover-Test liefert Informationen über die Qualität des Empfängers des Lidars [26]. Er wurde als Werkzeug der Qualitätssicherung von Lidarnetzwerkmessungen innerhalb des europäischen Projekts EARLINET-ASOS (**E**uropean **A**erosol **R**esearch **L**idar **N**etwork – **A**dvanced **S**ustainable **O**bservation **S**ystem) entwickelt. Es können Aussagen über die Justierung des Empfangsteleskops und der Strahlseparationseinheit gewonnen werden. Weiterhin kann die Realisierung der in Abschnitt 3.5 beschriebenen optischen Abbildung überprüft werden. Darüber hinaus gewinnt man Informationen über die Überlappungsfunktion. Schließlich ist es möglich, die Höhe zu bestimmen, ab der Lidarsignale ausgewertet werden können, ohne dass große systematische Fehler auftreten. Der Test wurde vor und nach den beschriebenen Umbauarbeiten am Ramanlidar MARTHA durchgeführt. Die Ergebnisse beider Tests werden hier vorgestellt.

Zunächst wird in Abschnitt 4.1.1 die Durchführung des Telecover-Tests beschrieben. Die Auswertung der gewonnenen Daten wird anschließend erläutert. Dazu behandelt Abschnitt 4.1.2 den Vergleich der gewonnenen Daten zwischen den einzelnen Nachweiskanälen. In Abschnitt 4.1.3 werden die Messungen der einzelnen Sektoren miteinander verglichen.

4.1.1 Durchführung

Bei der Durchführung des Tests wird der Hauptspiegel des Teleskops mit einer Schablone so abgedeckt, dass nur ein Achtel der Gesamtfläche frei bleibt. Die Einteilung des Hauptspiegels in Sektoren mit der Größe von je einem Achtel der Gesamtfläche des Spiegels ist in Abb. 19 gezeigt. Außerdem sind dort Abschattungen im Strahlengang des Teleskops aufgrund der Laserstrahlzuführung, des Tertiärspiegels und eines Nahfeldteleskops, das momentan nicht verwendet wird, dargestellt. Die Sektoren werden entsprechend der Konventionen des Lidarnetzwerks EARLINET mit den Himmelsrichtungen „Nord“, „Ost“, „Süd“ und „West“ sowie der Lage zur optischen Achse „innen“ und „außen“ bezeichnet. Die Bezeichnungen werden mit zwei Großbuchstaben abgekürzt, so dass zum Beispiel der äußere Westsektor mit „WA“ beschriftet wird. Dabei beziehen sich die Namen der Sektoren nicht auf die tatsächliche Lage der Sektoren zu den vier Himmelsrichtungen, sondern auf die Geometrie des Empfangsteleskops. Mit „Nord“ ist die Richtung bezeichnet, aus der der Laserstrahl eingekoppelt wird.

Für jeden Sektor wurde eine sechsminütige Messung durchgeführt. Zu Beginn und Ende der Messreihe sowie nach jeder zweiten Sektormessung wurde eine sechsminütige Referenzmessung ohne Teleskopabdeckung gemacht. Für die Auswertung wurden grundsätzlich die Signalverhältnisse V_i von den Sektormessungen M_i zu den davor und danach

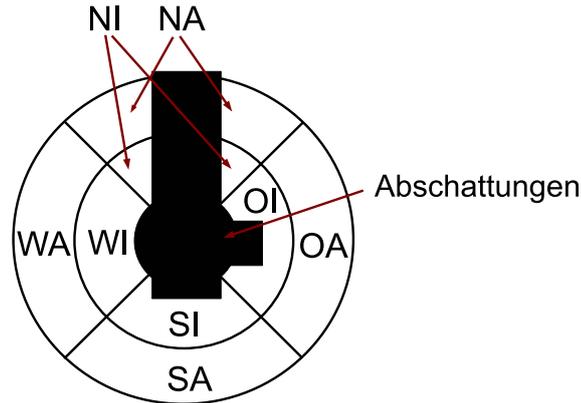


Abbildung 19: Lage und Bezeichnung der Sektoren des Hauptspiegels beim Telecover-Test aus der Draufsicht. Abschattungen des Strahlengangs sind schwarz eingezeichnet.

liegenden Referenzmessungen R_j bzw. R_{j+1} gemäß

$$V_i = 16 \frac{M_i}{R_j + R_{j+1}}, \quad i = OI, OA, SI, SA, WI, WA, NI, NA, \quad j = 0, 1, 2, 3 \quad (27)$$

genutzt. Durch die Arbeit mit diesen Signalverhältnissen wird der Einfluss von Änderungen atmosphärischer Eigenschaften auf die Messung minimiert. Grundsätzlich sollte der Test immer bei möglichst homogenen atmosphärischen Bedingungen durchgeführt werden. Die Normierung mit dem Faktor 16 bewirkt, dass für ein ideales Lidar die Signalverhältnisse bei 1 liegen, weil jeder Sektor $1/8$ des Gesamtsignals liefert. Im Folgenden werden die Höhenverläufe der V_i als „Test-Kurven“ des jeweiligen Sektors und Nachweiskanal bezeichnet.

Die Telecover-Tests wurden im Höhenbereich unterhalb von 5 km ausgewertet. Zum einen sind dort die gemessenen Lidarsignale stärker als in größeren Höhen und besitzen damit einen kleinen statistischen Fehler. Zum anderen machen sich in diesem Höhenbereich, in dem die Überlappungsfunktion auf 1 anwächst, Systemschwächen und Justierfehler besonders bemerkbar.

Der Telecover-Test wurde für das Teleskop des alten Lidaraufbaus am 6. Mai 2008 durchgeführt und nach den Umbauarbeiten am 26. September 2008 wiederholt. Die atmosphärischen Bedingungen zu Beginn und Ende beider Tests sind in Abb. 20 gezeigt. Dort ist der zeitliche Verlauf des logarithmierten, entfernungskorrigierten Lidarsignals des Nachweiskanal 1064 nm gezeigt. „Entfernungskorrigiert“ bedeutet dabei die Multiplikation des Signals mit dem Quadrat der Höhe. Dadurch wird der Signalabfall aufgrund des Faktors $1/z^2$ in der Lidargleichung korrigiert. Beide Tests fanden in klaren Nächten statt. Dadurch störte kein Streulicht von der Sonne die Messungen. Gegen Ende des Tests des alten Teleskops zogen Cirren in 9 bis 11 km Höhe auf, die in Abb. 20 rot dargestellt sind. Dies ist jedoch aufgrund des für die Auswertung benutzten Höhenbereichs von unterhalb 5 km unproblematisch. Bei beiden Tests wurde mit dem Gesichtsfeld gearbeitet, das für Standardmessungen genutzt wird bzw. wurde. Vor dem Umbau betrug dies 0.4 mrad, danach 0.5 mrad.

Der Nachweiskanal 532v wurde für beide Telecover-Messungen nicht genutzt. Über den

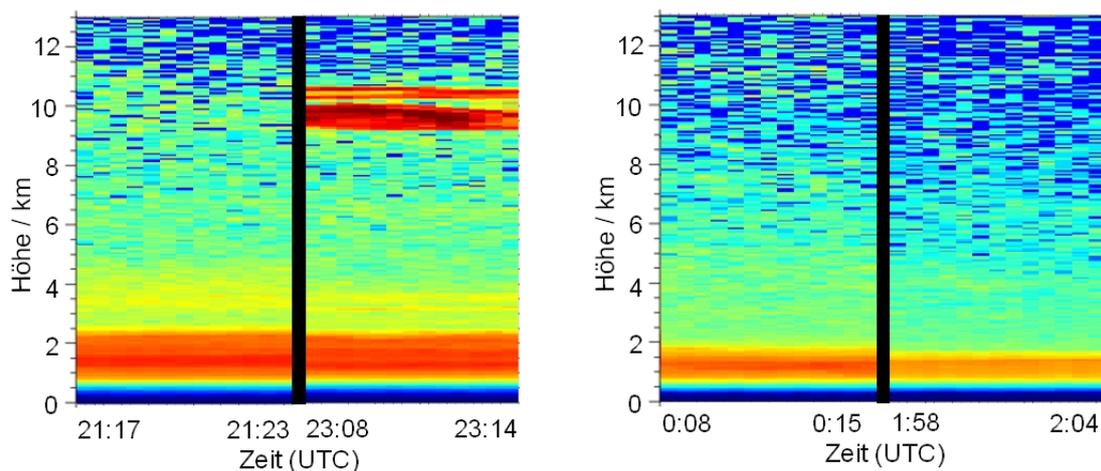


Abbildung 20: Entfernungskorrigiertes Lidarsignal bei 1064 nm vor und nach den Telecover-Messungen zur Veranschaulichung der atmosphärischen Bedingungen. Links: Bedingungen beim Test des alten Teleskops. Rechts: Bedingungen beim Test des neuen Teleskops. In der willkürlichen Farbskala wächst die Stärke der Rückstreuung von blau über grün und gelb bis rot. Rote und gelbe Farben zeigen Aerosolschichten bzw. Wolken an. Unterhalb von 1 km ist der Bereich unvollständiger Überlappung von Laserstrahl und Empfängeresichtfeld sichtbar.

dort verwendeten PMT R7400 und die dazugehörige Datenerfassung lagen zum Zeitpunkt der Tests noch keine ausreichenden Informationen vor (z.B. zu verwendende Diskriminatorschwelle), so dass noch keine aussagekräftigen Informationen zu gewinnen waren. Das Gleiche trifft auf die Nachweiskanäle für Mehrfachstreuung beim Telecover-Test des neuen Teleskops zu.

4.1.2 Vergleich der Test-Kurven der Nachweiskanäle

Durch den Vergleich der Telecover-Messungen verschiedener Nachweiskanäle kann die Justierung der Strahlseparationseinheit und der PMTs überprüft werden. Falls diese nicht optimal ist, treten Unterschiede im Verlauf der Test-Kurven der Nachweiskanäle auf. Da der Strahlengang durch das Teleskop für alle Nachweiskanäle identisch ist, spielt dieser bei dem Vergleich der Test-Kurven der Nachweiskanäle keine Rolle. Dadurch beeinflussen eventuelle Justierfehler des Teleskops diese Untersuchung nicht. In den Abbildungen 21 und 22 sind exemplarisch die Test-Kurven der Nachweiskanäle für die Messungen der Sektoren OI und OA mit dem neuen Aufbau gezeigt. Dabei ist die Test-Kurve des Nachweiskanals für Licht der Wellenlänge von 407 nm aufgrund der angesprochenen Fehler nur bis zu einer Höhe von 2.5 km dargestellt. Bereits ab ca. 1.5 km ist eine deutliche Zunahme des Rauschens zu sehen.

Für die Überprüfung der Justierung der Strahlseparationseinheit und der PMTs ist es zunächst sinnvoll, das Verhalten der Test-Kurven in Höhen zu untersuchen, in denen die Überlappungsfunktion 1 ist. Die dort konstante Überlappungsfunktion beeinflusst die Test-Kurven nicht. Deshalb und wegen der in Abschnitt 3.5.2 beschriebenen optischen Abbildung sind die Test-Kurven aller Nachweiskanäle aller Sektoren ab einer Höhe von

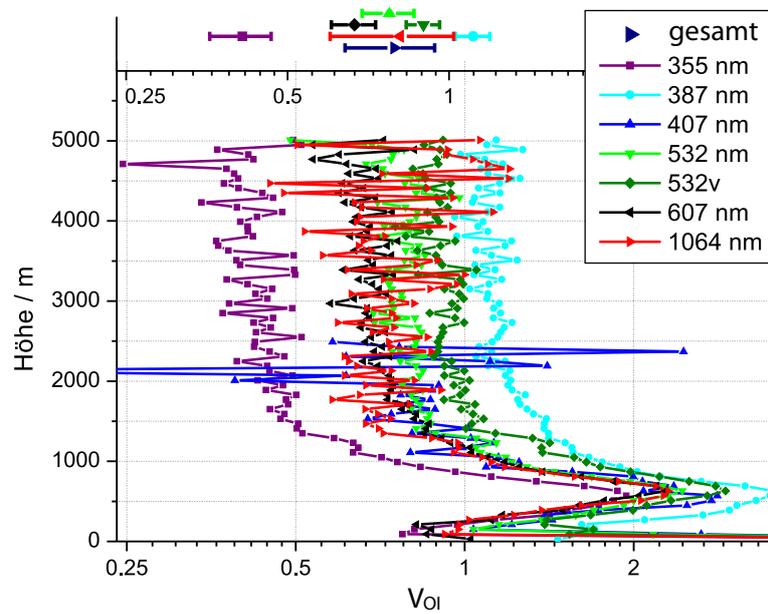


Abbildung 21: Test-Kurven vom Telecover-Test des neuen Teleskops im Sektor OI. Oben: Mittelwerte und Standardabweichungen im Höhenbereich von 3 bis 5 km. Dunkelblau ist das Mittel über die Nachweiskanäle 532 nm, 607 nm, 1064 nm und 532v dargestellt.

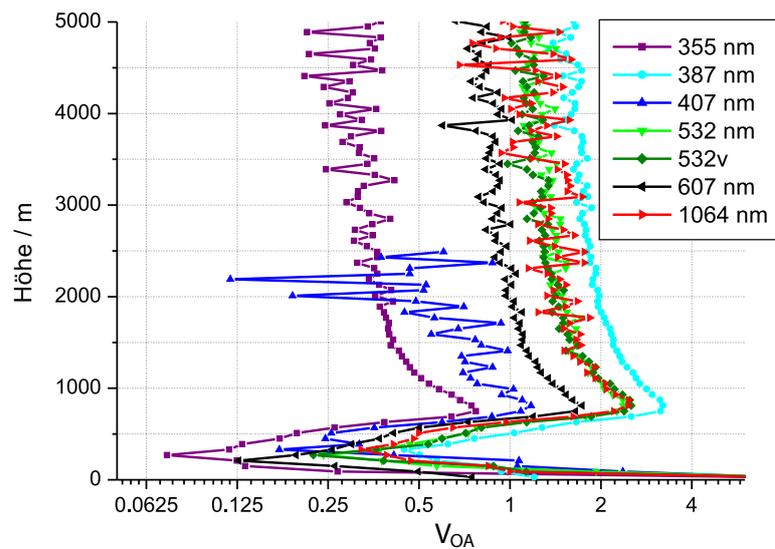


Abbildung 22: Test-Kurven vom Telecover-Test des neuen Teleskops im Sektor OA.

ca. 3 km konstant.

In Abb. 23 ist das Bild des Hauptspiegels mit der vorgenommenen Einteilung in Sektoren auf einer Photokathode gezeigt. Links befindet sich das Bild mittig auf der Photokathode. Das einfallende Licht trifft vollständig die Kathode. Rechts gibt es einen seitlichen Versatz des Bilds auf der Photokathode. In diesem Fall verfehlt ein Teil des Lichts, das auf den Hauptspiegel im Sektor WA trifft, die Photokathode (rot dargestellt). Dadurch nimmt für diesen Sektor die Test-Kurve des entsprechenden Nachweiskanals kleinere Werte an als die Test-Kurven von optimal justierten Kanälen. Der Versatz kann zum einen aus einer nicht exakten Justierung der PMTs und der Photomultiplier-Vorsätze resultieren. Zum anderen kann eine Verkipfung eines Strahlteilers oder Spiegels im Strahlengang des untersuchten Nachweiskanals zu diesem Versatz führen.

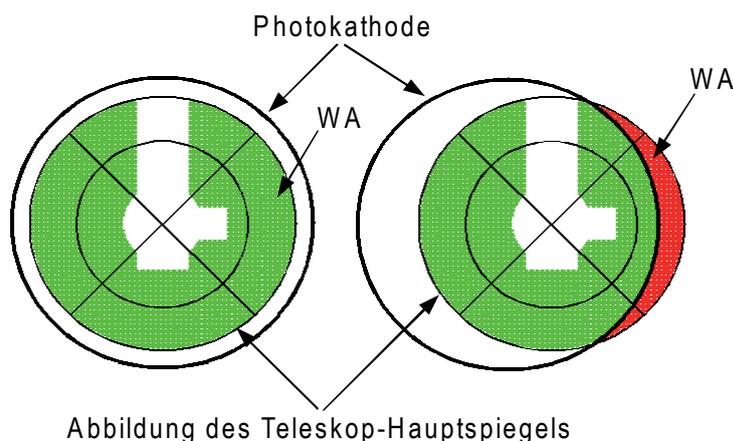


Abbildung 23: Darstellung einer mittigen (links) und seitlich versetzten (rechts) Abbildung des Hauptspiegels auf die Photokathode. Der rot dargestellte Teil der Abbildung trifft die Photokathode nicht.

Durch den Vergleich der Test-Kurven der Nachweiskanäle aus den einzelnen Sektormessungen lässt sich analysieren, ob es in einigen Kanälen zu einem Versatz des Bilds auf der Photokathode kommt. Dazu wurden von den Werten der Test-Kurven im Höhenbereich von 3150 bis 5070 m die Mittelwerte und Standardabweichungen bestimmt. Dieser Höhenbereich wurde gewählt, da es oberhalb von 3150 m kein systematisches Verhalten der Test-Kurven, z.B. aufgrund der Überlappungsfunktion, gibt (vgl. Abb. 10) und unterhalb von 5070 m die Test-Kurven nur mäßig verrauscht sind. Stimmt in einem Sektor dieser Mittelwert mit dem eines Nachweiskanals nicht innerhalb der Standardabweichung überein, so konnte daraus geschlossen werden, dass es in dem jeweiligen Nachweiskanal einen seitlichen Versatz zwischen optischer Abbildung und Photokathode gibt. In diesem Fall wurden der Mittelwert und die Standardabweichung der Gesamtheit der Test-Kurven ohne den entsprechenden Kanal neu berechnet. Diese Prozedur wurde so lange wiederholt, bis der Mittelwert der Gesamtheit der Kanäle mit den Mittelwerten der Kanäle, die zu dessen Berechnung genutzt wurden, innerhalb der Standardabweichung übereinstimmte. Die entsprechenden Werte sind für die OI-Messung des neuen Teleskops in Abb. 21 dargestellt. In Tabelle 14 ist für die einzelnen Sektoren aufgeführt, bei welchen Nachweiskanälen es zu den beschriebenen Abweichungen kam.

Der Nachweiskanal 407 nm wurde bei dieser Auswertung nicht benutzt, denn dessen

Tabelle 14: Nachweiskanäle, deren Test-Kurven im Höhenbereich von 3150 bis 5070 m signifikante Abweichungen von der Gesamtheit der übrigen Kanäle gezeigt haben.

Sektor	Nachweiskanäle mit signifikanten Abweichungen
NI	355 nm
NA	355 nm
OI	355 nm, 387 nm
OA	355 nm, 607 nm
SI	355 nm
SA	355 nm, 387 nm
WA	355 nm
WI	355 nm

Test-Kurve besitzt aufgrund der kleinen Signalintensität einen großen Fehler. Die Lidar-signale dieses Kanals sind generell schwächer als die der anderen, so dass für den Test dieses Nachweiskanals Messungen von deutlich über sechs Minuten Dauer nötig sind.

Bei einigen Sektormessungen liegen die Test-Kurven einzelner Nachweiskanäle oberhalb des Durchschnitts der Gesamtheit der Kanäle. Dies ist nicht darin begründet, dass der Sektor des entsprechenden Nachweiskanals mehr Licht empfängt als der der anderen Kanäle, sondern in der Betrachtung von Signalverhältnissen (Sektormessung zu Messung ohne Teleskopabdeckung) bei der Auswertung. Dadurch wächst beim Abfall des Verhältnisses in einigen Sektoren das Signalverhältnis der anderen Sektoren entsprechend an. Anhand von Abb. 23 wird ebenfalls klar, dass Abweichungen zwischen den Test-Kurven aufgrund eines Versatzes des entstehenden Bilds in den äußeren Sektoren größer sein müssen als in den Inneren, was exemplarisch in den Abbildungen 21 und 22 zu erkennen ist.

Anhand der in Tabelle 14 gezeigten Daten wird deutlich, dass es im Nachweiskanal 355 nm einen signifikanten Versatz zwischen optischer Abbildung und Photokathode gab. Im Nachweiskanal 387 nm gab es ebenfalls einen Versatz, obwohl er schwächer ausgeprägt war. Die nicht exakte Justierung dieser Kanäle wurde auch bei der Auswertung von Standardmessungen bemerkt. Daraufhin wurde der Strahlengang in diesen Kanälen untersucht und die beiden PMTs und PMT-Vorsätze nachjustiert. Der Nachweiskanal 607 nm kann ebenfalls noch optimiert werden, jedoch sind hier die Fehler nicht so groß wie bei den beiden anderen Kanälen.

Die Test-Kurven der Nachweiskanäle zeigen in allen Sektormessungen das gleiche Höhenverhalten, was exemplarisch für die Sektoren OI und OA in Abb. 21 bzw. 22 zu erkennen ist. Daraus kann eine gute Justierung der optischen Elemente, mit Ausnahme des bereits untersuchten Problems, gefolgert werden.

Der Strahlengang im alten Empfängeraufbau entspricht dem in Abb. 15 dargestellten. Der in acht Sektoren unterteilte Hauptspiegel wurde nicht auf die Kathoden der Photomultiplier abgebildet. Stattdessen wurde das einfallende Licht auf die Kathoden fokussiert. Aufgrund der daraus resultierenden unscharfen Lage der Sektoren auf den Kathoden war es nur möglich sehr große Versätze zwischen Strahlenbündel und Photokathode mit der beschriebenen Auswertung des Telecover-Tests festzustellen. Dennoch konnten Unterschiede

bei der Test-Kurve des Nachweiskanals 532h gegenüber den übrigen Kanälen bei den Messungen der Sektoren OA, OI und WI registriert werden. Bei den anderen Nachweiskanälen konnten keine signifikanten Abweichungen festgestellt werden. In den Abbildungen 24 und 25 sind exemplarisch die Verläufe der Test-Kurven von den Messungen der Sektoren OA und NA gezeigt.

Untersucht man das Verhalten der Test-Kurven des alten Teleskops unterhalb von 3 km, so lassen sich bei allen Sektormessungen Unterschiede zwischen der Test-Kurve des 1064-nm-Nachweiskanals und den Kurven der übrigen Kanäle zwischen ca. 0.8 und 2.5 km feststellen. In den Sektormessungen SA bzw. WA zeigen auch die Nachweiskanäle 607 nm und 532h Abweichungen. Daraus lässt sich folgern, dass insbesondere der Nachweiskanal 1064 nm nicht gut justiert war. Die Ursache kann eine unscharfe Fokussierung des einfallenden Lichts auf die Photokathode sein. Bei kleinen Rückstreuhöhen ist dann der Strahldurchmesser auf der Photokathode zu groß und trifft nicht vollständig die Kathode. Dadurch ist dort die Test-Kurve des 1064 nm-Kanals kleiner als die Kurven anderer Kanäle. Mit zunehmender Rückstreuhöhe verringert sich der Strahldurchmesser, ein größerer Anteil des einfallenden Lichts kann detektiert werden und die Test-Kurve wächst und nähert sich den Kurven der anderen Kanäle an.

4.1.3 Vergleich der Test-Kurven der Sektoren des Hauptspiegels

Mit Ausnahme der fehlerhaft justierten Nachweiskanäle 355 nm und 387 nm sowie des Kanals 407 nm wurden die Test-Kurven der Sektoren in jedem einzelnen Nachweiskanal miteinander verglichen. Dabei wurden die Test-Kurven so normiert, dass die Mittelwerte aus den jeweiligen Werten im Höhenbereich zwischen 3 und 5 km gleich 1 sind. In den Abbildungen 26 und 27 sind die Sektormessungen der Nachweiskanäle 532 nm bzw. 607 nm gezeigt.

Alle untersuchten Nachweiskanäle zeigen beim Telecover-Test des neuen Teleskops das gleiche Höhenverhalten: Die Test-Kurven der Sektoren SI, WI und OI nehmen unterhalb von 800 m Werte deutlich größer als 1 an. Alle Test-Kurven der äußeren Sektoren ergaben dort Werte von unter 1. Mit zunehmender Höhe fallen bzw. wachsen die Test-Kurven auf den Wert 1, der in ca. 3 km Höhe erreicht wird. Die Maxima und Minima der Sektormessungen treten bei allen Kanälen in der jeweils gleichen Höhe auf und nehmen ähnliche Werte an. Dabei sind die Minima in den Sektoren WA und NA stärker ausgeprägt als in den Sektoren OA und SA. Nach Annahme des Minimums steigt die Test-Kurve im Sektor NA erst in größeren Höhen als bei den Sektoren OA und SA an. Die Zunahme im Sektor WA setzt in noch größeren Höhen ein, bei ca. 700 m. Die Messungen des Sektors NI zeigen keinen ausgeprägten Höhengang.

Die Konstanz der Messungen oberhalb der von der Überlappungsfunktion beeinflussten Höhen bedeutet, dass mit dem Telecover-Test weder eine Veränderung des Durchmessers noch der Lage des Lichtbündels auf den Photokathoden mit der Höhe festzustellen ist. Daraus lässt sich eine optimale Realisierung der in Abschnitt 3.5.2 beschriebenen optischen Abbildung schließen.

Die Höhenabhängigkeit der Test-Kurven unterhalb von 3 km wird durch die Feldblende verursacht. Diese schattet überwiegend Strahlen ab, die im äußeren Bereich des Lichtbündels laufen und deshalb den Hauptspiegel in den äußeren Sektoren treffen. Dadurch sind die Werte der Test-Kurven in den äußeren Sektoren kleiner als in den inneren. Der Einfluss der Abschattungen nimmt mit wachsender Höhe der Rückstreuorte ab. Oberhalb von ca. 3 km Höhe wird an der Blende kein zurückgestreutes Laserlicht abgeschattet. Dort sind die

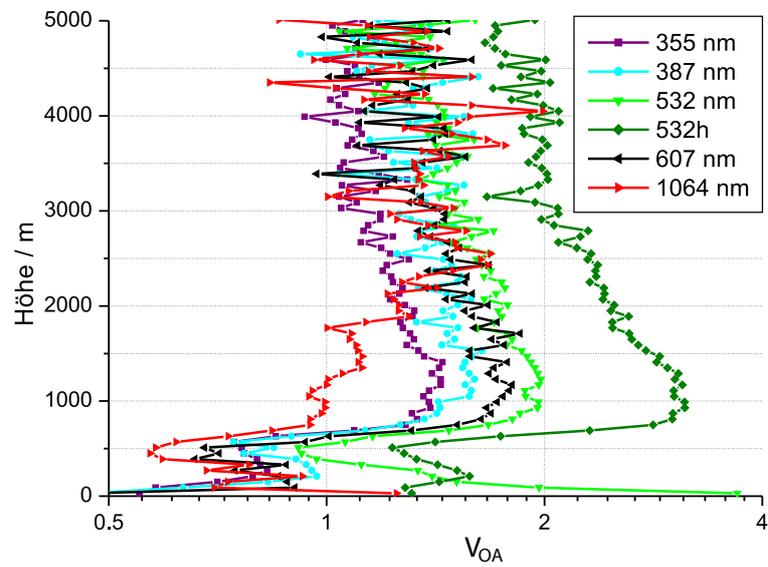


Abbildung 24: Test-Kurven vom Telecover-Test des alten Teleskops im Sektor OA.

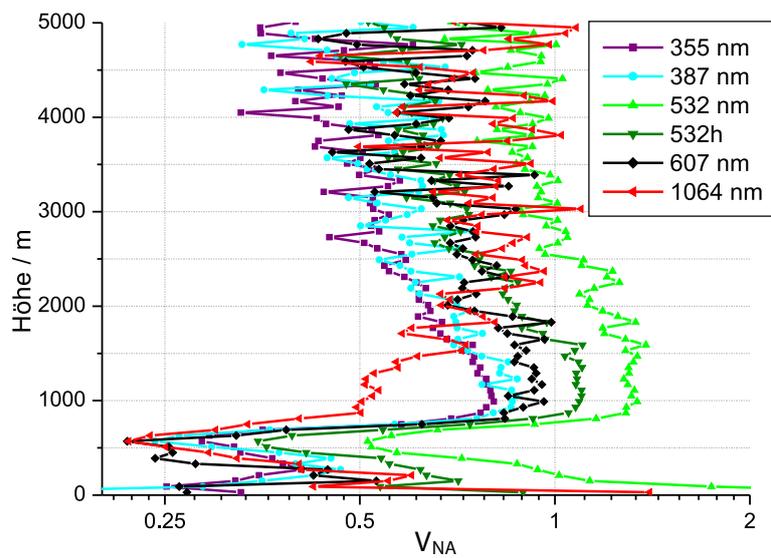


Abbildung 25: Test-Kurven vom Telecover-Test des alten Teleskops im Sektor NA.

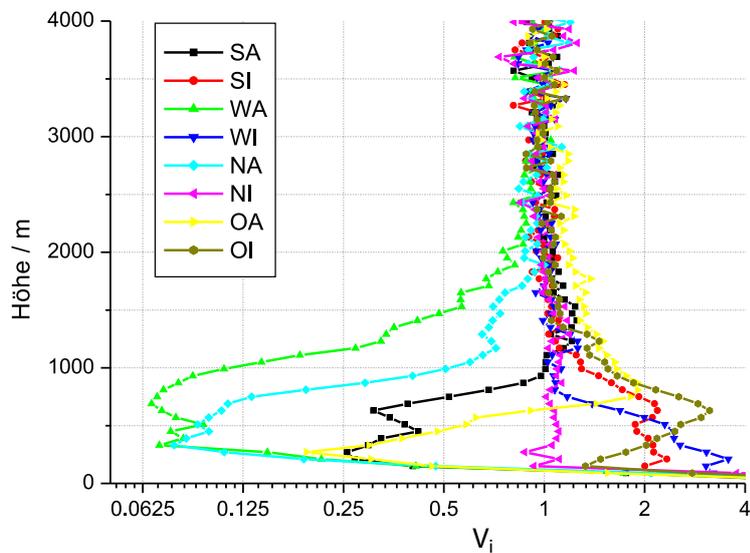


Abbildung 26: Sektormessungen beim Telecover-Test des Nachweiskanal 532 nm im neuen Teleskop.

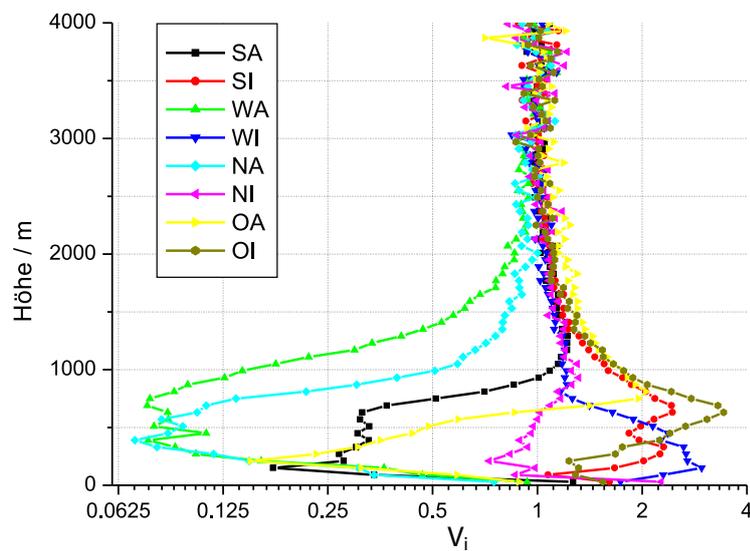


Abbildung 27: Sektormessungen beim Telecover-Test des Nachweiskanal 607 nm im neuen Teleskop.

Test-Kurven konstant 1, und die Überlappungsfunktion ist auf ihr Maximum angewachsen. Dies steht im Einklang mit der in Abschnitt 3.3.3 ermittelten Überlappungsfunktion. Weiterhin liegen die Test-Kurven oberhalb von 2 km nah bei 1, was ebenfalls mit Abb. 10 übereinstimmt. Dort wächst die Überlappungsfunktion oberhalb von 2 km deutlich schwächer als in kleineren Höhen.

Dass die Test-Kurven des NI Sektors keinen ausgeprägten Höhengang besitzen, kann an den großen Abschattungen in diesem Sektor liegen (siehe Abb. 19). Zum einen werden in dem dadurch schwächeren Lidarsignal höhenabhängige Unterschiede weniger deutlich. Zum anderen ist die Wirkung der Abschattungen direkt abhängig von der Rückstreuhöhe. Zum Beispiel haben die Überlappungsfunktionen mit und ohne Abschattungen unterschiedliche Verläufe. Die Abschattungen im Teleskop können auch die Ursache für die leicht unterschiedliche Lage und Stärke der Maxima der Test-Kurven in den Sektoren SI, WI und OI sein.

In den Sektoren WA, SA und OA treten keine Abschattungen beim Durchlaufen des Empfangsteleskops auf. Dennoch ist das Minimum der Test-Kurve des Sektors WA kleiner als das der Sektoren OA und SA. Außerdem wachsen die Test-Kurven der Sektoren OA und SA bereits in kleineren Höhen auf 1 an als die Kurve des Sektors WA. Die Ursache kann eine Verkipfung des Laserstrahls in Richtung der Sektoren Ost und Süd sein. Da die Ausrichtung des Laserstrahls zur optischen Achse des Empfangsteleskops vor Messungen mit einer Kamera regelmäßig überprüft und gegebenenfalls korrigiert wird (siehe Abschnitt 3.4.1), kann nicht auf eine dauerhafte Verkipfung des Laserstrahls in diese Richtungen geschlossen werden. Jedoch ist aus den Ergebnissen zu folgern, dass generell Abweichungen zwischen der Ausbreitungsrichtung des Laserstrahls und der optischen Achse des Empfangsteleskops zu erwarten sind.

Bereits in Abschnitt 2.2 wurde erwähnt, dass es möglich ist, Lidardaten in Höhen auszuwerten, in denen die Überlappungsfunktion ungleich 1 ist. Neben der Verwendung von Korrekturfunktionen ist dies durch das Betrachten von Verhältnissen aus Lidarsignalen möglich. In dem in Ref. [27] beschriebenen Verfahren werden die Verhältnisse der Lidarsignale von elastisch und inelastisch gestreutem Licht zur Bestimmung des Höhenprofils des Rückstreuoeffizienten gebildet. Dabei haben die Überlappungsfunktionen der verwendeten Kanäle keinen Einfluss, wenn sie identisch sind. Erst in kleinen Höhen, wo deren Ableitungen sehr groß werden, treten Unterschiede zwischen den Überlappungsfunktionen auf und eine Auswertung ohne Korrekturen ist mit großen systematischen Fehlern behaftet. Es wurde die Höhe, bis zu der Auswertungen von Rückstreuungsmessungen möglich sind, mit dem Telecover-Test bestimmt. Dafür wurden die Verhältnisse der Test-Kurven der Nachweiskanäle 1064 nm bzw. 532 nm zu der des 607-nm-Kanals gebildet. Der Verlauf dieser Verhältnisse für die einzelnen Sektoren ist in den Abbildungen 28 und 29 gezeigt. Dabei kommt es oberhalb von 500 m zu keinen Abweichungen, die größer sind als die statistischen Schwankungen der Kurvenverläufe. Damit können ab einer Höhe von 500 m ohne die Benutzung von Korrekturfunktionen Ramansignale ausgewertet werden.

In Abb. 30 sind die Test-Kurven des 607-nm-Kanals vom Telecover-Test des alten Empfängerbaus exemplarisch dargestellt. Bei diesem Test waren in allen Nachweiskanälen die Werte der Test-Kurven der inneren Sektoren unterhalb von 400 m größer als die der äußeren Sektoren. Im Höhenbereich von 500 bis 2500 m liegen die Test-Kurven der äußeren Sektoren jedoch deutlich über denen der Inneren. Der Höhengang lässt sich nicht allein durch Abschattungen an der Feldblende erklären. In jedem Nachweiskanal ist der Höhengang der Sektormessungen ähnlich. Das deutet darauf hin, dass die Ursache

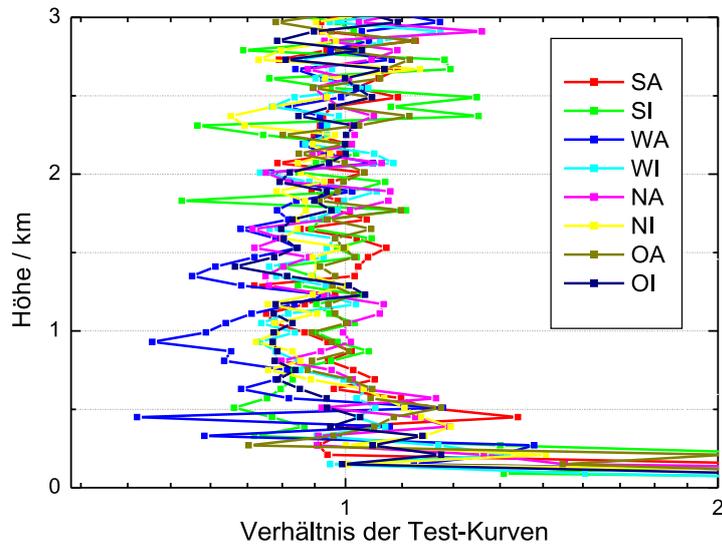


Abbildung 28: Verhältnisse der Test-Kurven des 532-nm-Kanals zu denen des 607-nm-Kanals beim Telecover-Test des neuen Teleskops.

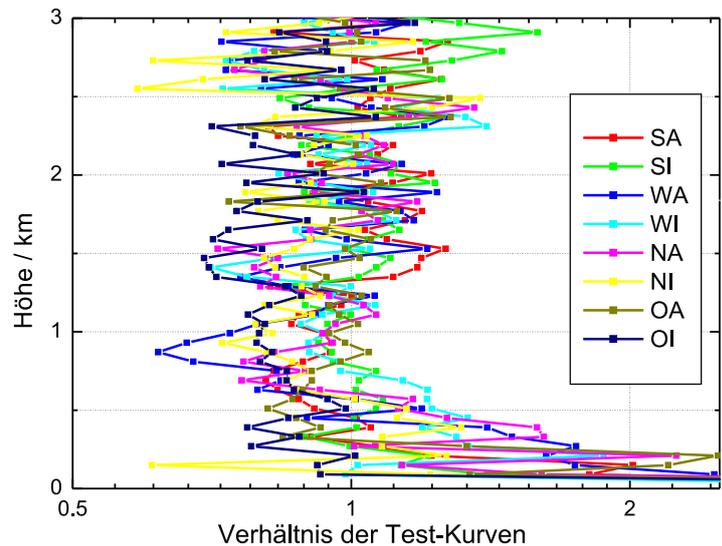


Abbildung 29: Verhältnisse der Test-Kurven des 1064-nm-Kanals zu denen des 607-nm-Kanals beim Telecover-Test des neuen Teleskops.

des beschriebenen Höhenverhaltens beim Empfangsteleskop und nicht in der Strahlseparationseinheit liegt. Der Hauptspiegel des alten Teleskops zeigte Abweichungen von der idealen parabolischen Form. Die Brennweite des Teleskops war deshalb für achsenferne und achsennahe Strahlen verschieden. Eine schlechte Fokussierung des Lichts der inneren Sektoren auf die Photokathoden kann deren kleine Test-Kurven im Höhenbereich von 500 bis 2500 m erklären. Wahrscheinlich war in diesem Höhenbereich das Strahlenbündel von diesen Sektoren so groß, dass es nicht vollständig die Kathode getroffen hat. Mit zunehmender Rückstreuöhe verringerte sich der Durchmesser des Strahlenbündels und die Test-Kurven nahmen zu.

Abb. 31 zeigt, dass das Verhältnis aus den Werten der Test-Kurven der Nachweiskanäle 532 nm und 607 nm unterhalb von 2.3 km in den Sektoren OI, OA, NI und NA nicht konstant ist. Das Verhältnis aus den Werten der Nachweiskanäle 1064 nm und 607 nm zeigte noch stärkere Abweichungen in allen Sektoren bis auf den OA-Sektor. Diese resultieren wahrscheinlich zum Teil aus der in Abschnitt 4.1.2 beschriebenen schlechten Fokussierung des Strahlenbündels auf die Kathode des 1064-nm-Kanals. Damit konnten mit dem alten Empfängeraufbau unterhalb einer Höhe von 2.3 km Ramansignale nicht standardmäßig ausgewertet werden.

4.2 Test des Einflusses von Schrägstellung und endlicher Dicke der Spiegelblende

Vor den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Umbauarbeiten wurde im Ramanlidar MARTHA mit einer Feldblende vernachlässigbarer Dicke gearbeitet. Weiterhin stand diese Feldblende senkrecht zur optischen Achse. Die im neuen Aufbau verwendeten Spiegelblenden, die in Abschnitt 3.3.2 beschrieben wurden, besitzen jedoch eine Dicke von 2 mm und stehen unter 45° im Strahlengang. Es wurde untersucht, ob sich diese Unterschiede auf die gemessenen Lidarsignale auswirken.

Die endliche Blendendicke bewirkt, dass der Durchmesser eines konvergenten Strahlenbündels durch die Vorderseite der Blende bestimmt wird, jedoch der Durchmesser eines divergenten Strahlenbündels durch deren Rückseite. Diese beiden Typen von Strahlenbündeln treten im Empfänger des Ramanlidars, aufgrund der in Abschnitt 3.3.3 beschriebenen Abhängigkeit der Lage des Brennpunkts von der Rückstreuhöhe, auf. Damit ist im Ramanlidar MARTHA die Apertur, die als Blende fungiert, für unterhalb von 4 km zurückgestreutes Licht die Vorderseite der Spiegelblende. Dabei bezieht sich die Definition der Vorderseite auf die Betrachtung der Blende aus Richtung des Empfangsteleskops. Für oberhalb von 4 km zurückgestreutes Licht ist die Rückseite der Spiegelblende als Blende wirksam. Im Ramanlidar MARTHA beträgt der Abstand zwischen Vorder- und Rückseite der Spiegelblende bei Betrachtung unter 45° etwa 2.8 mm. Es ist möglich, dass daraus ein Effekt auf die Überlappungsfunktion resultiert, da die Position der Blende den Verlauf der Überlappungsfunktion beeinflusst, wie in Abschnitt 3.3.3 erläutert wurde.

Die Stellung der Spiegelblende unter 45° im Strahlengang kann ebenfalls einen Einfluss auf die Überlappungsfunktion haben. Licht aus verschiedenen Bereichen des Gesichtsfelds trifft die Blende an unterschiedlichen Stellen, die aufgrund der Schrägstellung der Blende nicht alle den gleichen Abstand zum Empfangsteleskop besitzen.

Der Einfluss der endlichen Dicke und Schrägstellung der Spiegelblende wurde mit Hilfe eines Makros zur Ermittlung der Überlappungsfunktion in Zemax untersucht. Dieses Makro arbeitet ähnlich dem in Abschnitt 3.4.1 beschriebenen Makro zur Berechnung der

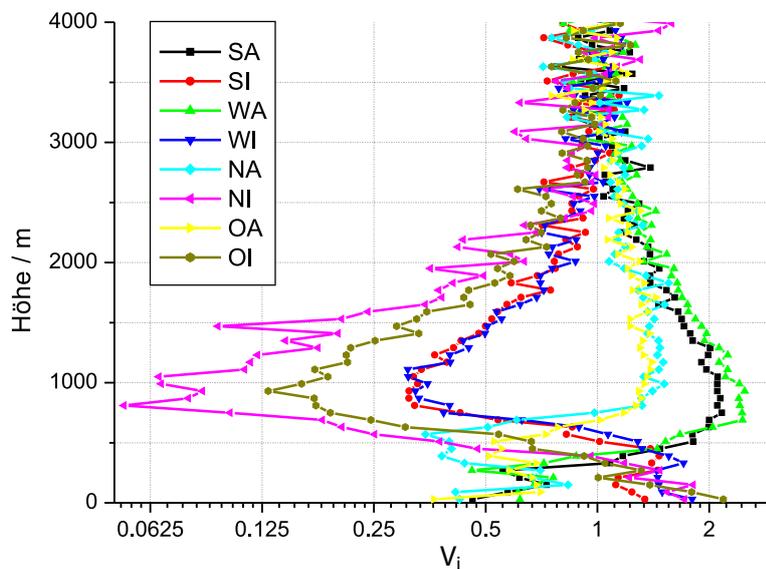


Abbildung 30: Test-Kurven beim Telecover-Test des Nachweiskanal 607 nm im alten Teleskops.

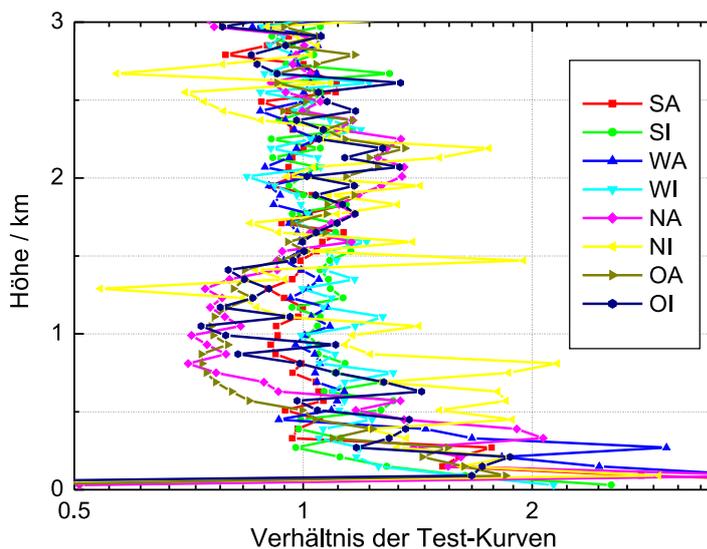


Abbildung 31: Verhältnis der Test-Kurven des 532-nm-Kanals zu denen des 607-nm-Kanals beim Telecover-Test des alten Teleskops.

Einfallswinkel an optischen Komponenten. Hier wird das Verhältnis der Anzahl der Strahlen, die die Feldblende passieren, zu denen, die den Hauptspiegel treffen, berechnet. Dieses Verhältnis entspricht für eine ausreichend große Anzahl von Strahlen dem Wert der Überlappungsfunktion in der Höhe, in der die Strahlen erzeugt wurden. Es wurde mit einem Gesichtsfeld von 0.5 mrad gearbeitet.

Der Verlauf der Überlappungsfunktion wird durch die Eigenschaften des Laserstrahls deutlich beeinflusst. Die ausschlaggebenden Parameter des Laserstrahls sind vor allem dessen Divergenz, radiale Intensitätsverteilung und die Ausrichtung bzgl. der optischen Achse des Empfangsteleskops. Das ist in Abb. 32 verdeutlicht. Dort ist die für das Ram-anlidar MARTHA simulierte Überlappungsfunktion für eine Divergenz des Laserstrahls von 0.2 mrad, eine gaußförmig radiale Intensitätsverteilung im Laserstrahl und eine exakte Ausrichtung des Laserstrahls zur optischen Achse des Empfangsteleskops gezeigt. Die Laserstrahldivergenz ist dabei so definiert, dass am Rand des Laserstrahls die Intensität auf $1/e^2$ des Wertes in der Strahlmitte abfällt. Weiterhin sind Überlappungsfunktionen dargestellt, bei denen jeweils einer der aufgeführten Parameter verändert wurde. Es sind Überlappungsfunktionen mit einer Laserstrahldivergenz von 0.3 mrad, einer radial gleichmäßigen Intensitätsverteilung und einer Verkippung der Ausbreitungsrichtung des Laserstrahls von der optischen Achse des Teleskops um 0.1 mrad gezeigt.

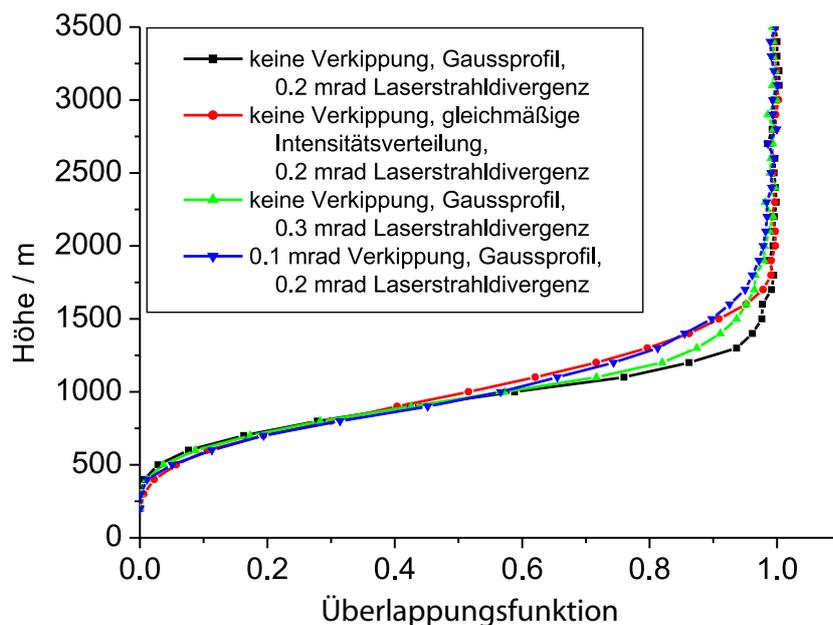


Abbildung 32: Simulierte Überlappungsfunktionen bei unterschiedlichen Parametern des Laserstrahls. Schwarz: Laserstrahl mit Ausbreitung entlang der optischen Achse des Empfangsteleskops mit gaußförmiger radialer Intensitätsverteilung und einer Strahldivergenz von 0.2 mrad. Die anderen Kurven ergeben sich aus der Variation der Ausrichtung des Laserstrahls (0.1 mrad Verkippung, blau), der radialen Intensitätsverteilung (gleichförmig, rot) und der Laserstrahldivergenz (0.3 mrad, grün).

Damit der Einfluss der Spiegelblende auf die Signale simuliert werden konnte, mussten

zunächst die genannten Parameter des Laserstrahls ermittelt werden. Dafür wurden diese Parameter variiert, bis die simulierte Überlappungsfunktion mit der Überlappungsfunktion aus der Messung (siehe Kapitel 3.3.3) gut übereinstimmte. In den Simulationen wurde mit einer 2 mm dicken Blende unter 45° im Strahlengang gearbeitet. Das beste Ergebnis wurde mit einer Divergenz des Laserstrahls von 0.2 mrad, einer Verkippung des Laserstrahls von der optischen Achse um 0.13 mrad und einer gaußförmigen Intensitätsverteilung in radialer Richtung im Laserstrahl erreicht. Die Vergrößerung der Strahldivergenz von 0.1 auf 0.2 mrad (siehe Abschnitt 3.1) kann durch geringe Abweichungen in der Justierung der Sendeeinheit (z.B. des Aufweitungsteleskops) erklärt werden. Dass eine geringe Verkippung des Laserstrahls wahrscheinlich ist, wurde bereits durch den Telecover-Test festgestellt. Die Überlappungsfunktionen aus der Simulation und der Messung sind in Abb. 33 gezeigt.

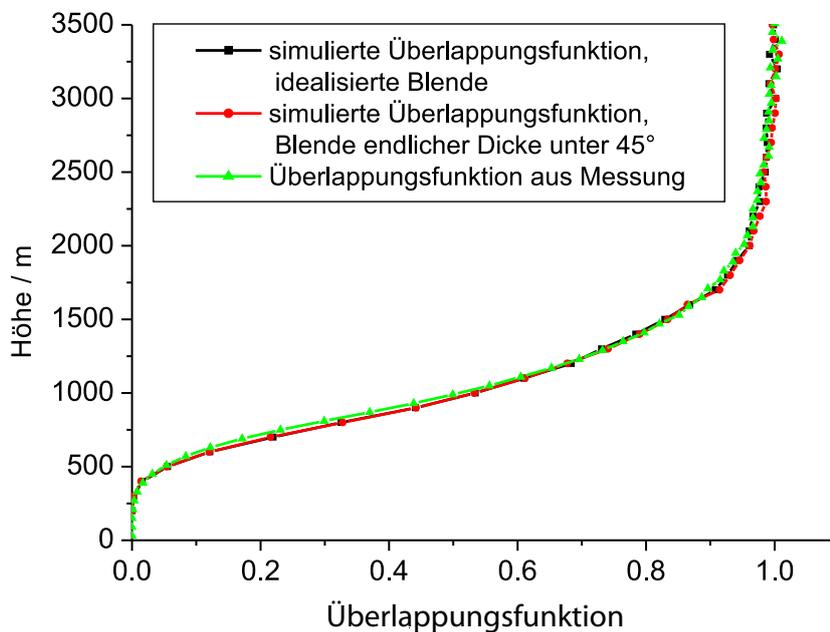


Abbildung 33: Vergleich der simulierten (mit Spiegelblende und idealer Blende) und der gemessenen Überlappungsfunktionen zur Untersuchung des Einflusses der endlichen Dicke und Schrägstellung der Spiegelblende.

Mit den ermittelten Parametern des Laserstrahls wurde die Überlappungsfunktion für eine Blende unendlicher Dicke, die senkrecht zur optischen Achse im Empfänger steht, simuliert. Diese ist ebenfalls in Abb. 33 gezeigt. Sie zeigt keine feststellbare Abweichung von den beiden anderen Funktionen. Daraus kann gefolgert werden, dass die Nutzung der Spiegelblende keinen Einfluss auf die Lidarsignale hat.

4.3 Akzeptanzwinkel der Interferenzfilter und des dichroitischen Spiegels in den Mehrfachstreukanälen

In Abschnitt 3.4.2 wurde erläutert, dass die Einfallswinkel an den optischen Elementen der Mehrfachstreukanäle deutlich größer sind als an denen der Einfachstreukanäle oder des

bisherigen Empfängeraufbaus. Deshalb wurde untersucht, ob die ermittelten maximalen Einfallswinkel von 1.9° bzw. 3.4° bei Gesichtsfeldern von 2.0 bzw. 3.8 mrad außerhalb des Akzeptanzbereichs des dichroitischen Strahlteilers und der Interferenzfilter liegen.

Die Interferenzfilter der Mehrfachstreukanäle wurden mit Zemax untersucht. Dabei ist es möglich, auf Elementen Beschichtungen, bestehend aus mehreren Schichten vorgegebbarer Brechungsindizes, zu definieren. Das Programm Zemax beinhaltet Analysefunktionen, mit denen das Wellenlängen- und Winkelverhalten dieser Beschichtungen simuliert werden kann. Interferenzfilter bestehen aus einer Folge von dielektrischen Schichten zweier unterschiedlicher Brechungsindizes. Typische Materialien sind z.B. SiO_2 oder Ta_2O_5 . Die Schichtfolge lässt bei senkrechtem Einfall Licht mit der Zentralwellenlänge bei Transmission konstruktiv interferieren. Dementsprechend wird Licht anderer Wellenlängen geschwächt. Zwischen zwei Folgen dielektrischer Schichten befindet sich eine Zwischenschicht mit der Dicke eines Vielfachen der halben Zentralwellenlänge. Diese Anordnung bezeichnet man als eine „Cavity“. Interferenzfilter bestehen meist aus mehreren aneinander gereihten Cavities. Bei der Simulation eines Interferenzfilters hat man dementsprechend hauptsächlich vier Freiheitsgrade: Die Wahl des Materials und damit der Brechungsindizes der beiden dielektrischen Schichten, die Dicke der Zwischenschicht sowie die Anzahl der Cavities. Es war nicht möglich, Angaben über diese Größen von den Herstellern zu erhalten. Jedoch konnte auf Erfahrungen aus dem europäischen Lidarnetzwerk EARLINET zurückgegriffen werden. Innerhalb dieses Netzwerks wurden bereits mit guter Genauigkeit Interferenzfilter simuliert. Es wurden Filter erstellt, deren Eigenschaften den Interferenzfiltern in den Mehrfachstreukanälen entsprechen. Der Parameter der Interferenzfilter, der die Winkelakzeptanz am stärksten beeinflusst, ist die Bandbreite. Diese beträgt beim Filter im 532m-Kanal 5 nm, im 607m-Kanal 3 nm. Die winkelabhängige Transmission der simulierten Interferenzfilter ist in Abb. 34 gezeigt. Es ist zu erkennen, dass beide Interferenzfilter einen Akzeptanzwinkel von über 5° besitzen. Damit liegen die maximalen Einfallswinkel an den Interferenzfiltern von 1.9° bzw. 3.4° im Akzeptanzbereich und lassen eine Justiertoleranz von mehr als 1.5° .

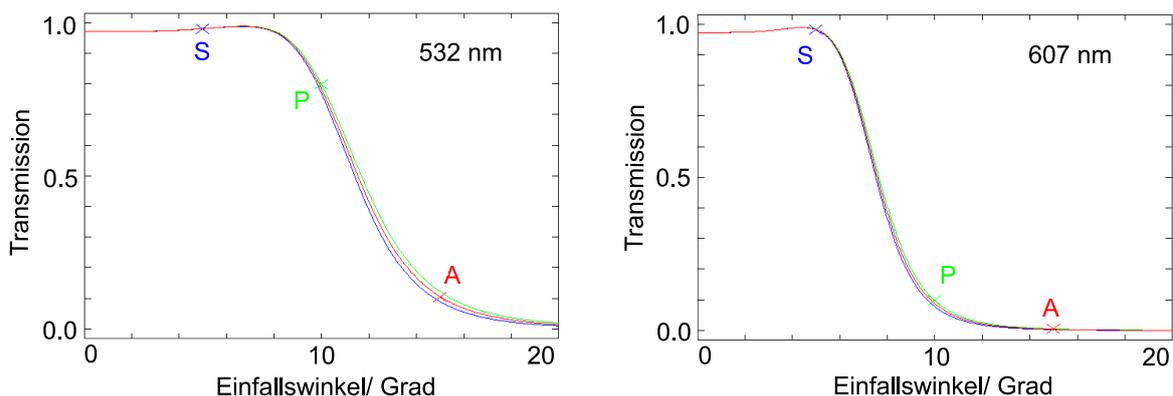


Abbildung 34: Simulierte winkelabhängige Transmission der Interferenzfilter in den Kanälen zur Detektion von Mehrfachstreuung für senkrecht (S) und parallel (P) zur Einfallsebene polarisiertes Licht sowie unpolarisiertes Licht (A).

Weiterhin wurde das Winkelverhalten von Interferenzfiltern mit anderen dielektrischen Beschichtungen aber ähnlichen Zentralwellenlängen und Bandbreiten simuliert. Damit

können eventuelle Fehler im Fall einer nicht korrekten Wahl der dielektrischen Schichten abgeschätzt werden. Bei keinem der untersuchten Filter veränderte sich der Akzeptanzbereich der Einfallswinkel um mehr als 1° .

Für die Abschätzung des Winkelverhaltens des dichroitischen Strahlteilers standen Informationen bzgl. der wahrscheinlichen Schichtfolge und der verwendeten Materialien nicht zur Verfügung. Dementsprechend war es nicht möglich, den dichroitischen Strahlteiler in Zemax zu simulieren. Auf Nachfrage konnte der Hersteller, die L.O.T.-Oriel GmbH, abschätzen, dass bei einer Verkippung des Strahlteilers um 5° sich dessen Flanke um deutlich weniger als 2 nm verschiebt. Da die Flanke des Übergangs zwischen Transmission und Reflexion zwischen 550 und 600 nm liegt, liegen auch hier die maximalen Einfallswinkel im Akzeptanzbereich.

5 Messungen

In diesem Kapitel werden die durchgeführten Messungen von Mehrfachstreuung in Wasserwolken vorgestellt. Anhand einer ausgewählten Messung werden die Signalverläufe erklärt. In Abschnitt 5.2 wird auf die Kalibrierung der gemessenen Signale eingegangen. Die Ergebnisse der Auswertung einer Messung mit dem Inversionsalgorithmus werden in Abschnitt 5.3 präsentiert.

5.1 Messbeispiele

Es wurden an vier Tagen insgesamt acht Wolken mit dem Ramanlidar MARTHA untersucht. Die Messtage und -zeiten sind in Tabelle 15 gezeigt. Dort sind auch die Höhen der Unterkanten der untersuchten Wolken und die Größe des Gesichtsfelds für die Messung von Mehrfachstreuung angegeben.

Tabelle 15: Übersicht über die Mehrfachstreu-Wolkenmessungen.

Datum	Messzeit (UTC)	Höhe der Wolkenunterkante	Gesichtsfeld für Messung von Mehrfachstreuung
07.11.08	20:50:10 – 22:14:40	ca. 0.8 km	2.0 mrad
07.11.08	22:43:50 – 23:26:00	ca. 0.8 km	4.0 mrad
13.11.08	15:18:40 – 15:57:50	ca. 1.5 km	2.0 mrad
13.11.08	16:39:10 – 17:06:40	ca. 1.5 km	2.0 mrad
14.11.08	16:20:10 – 17:17:00	ca. 1.0 km	2.0 mrad
14.11.08	17:22:20 – 17:49:00	ca. 1.8 km	2.0 mrad
14.11.08	17:43:30 – 18:21:20	ca. 2.8 km	2.0 mrad
14.11.08	19:00:30 – 20:23:20	ca. 2.0 km	2.0 mrad
14.11.08	19:41:00 – 20:41:00	ca. 1.3 km	2.0 mrad
15.11.08	20:20:10 – 22:39:10	ca. 1.0 km	4.0 mrad

Abb. 35 zeigt das Lidarsignal für einfach gestreutes Licht bei 532 nm von der Messung am 14.11.2008 von 16:20:10 bis 18:21:20 Uhr in Form einer Zeit-Höhen-Darstellung. Die zeitliche Auflösung beträgt 10 s. Die Signale haben eine Höhenauflösung von 15 m. Die Wolken in den Höhen von ca. 1.0, 1.8 und 2.8 km sind rot zu erkennen. Für einen ersten Versuch zur Bestimmung der Tröpfchengröße wurde die Wolke in ca. 2.8 km ausgewählt. Dafür wurden die Messungen der Profile 500 bis 727 addiert. Dieser Bereich ist in Abb. 35 markiert. Die Lidarsignale des äußeren und inneren Gesichtsfelds bei 607 nm sind in Abb. 36 gezeigt. Weiterhin ist die Zählrate eingezeichnet, bei deren Unterschreitung der statistische Fehler des jeweiligen Signals auf über 10% anwächst, und die Summe sowie das Verhältnis der Signale aus äußerem und innerem Gesichtsfeld. Auf den statistischen Fehler der Lidarsignale wird in Abschnitt 6.2 eingegangen.

In Abb. 36 wird im Signal des äußeren Gesichtsfelds bei 350 m ein Maximum beobachtet. Dieses resultiert aus der Detektion von einfach gestreutem Licht im äußeren Gesichtsfeld bei kleinen Rückstreuhöhen. In 350 m ist die Überlappungsfunktion für das innere Gesichtsfeld deutlich kleiner als 0.1 (siehe Abb. 10). Entsprechend kommt es zu großen Abschattungen des zurückgestreuten Laserlichts an der Blende. Aufgrund der Verwendung der Spiegelblende wird ein Teil dieses Lichts in die Nachweiskanäle für Mehrfachstreuung

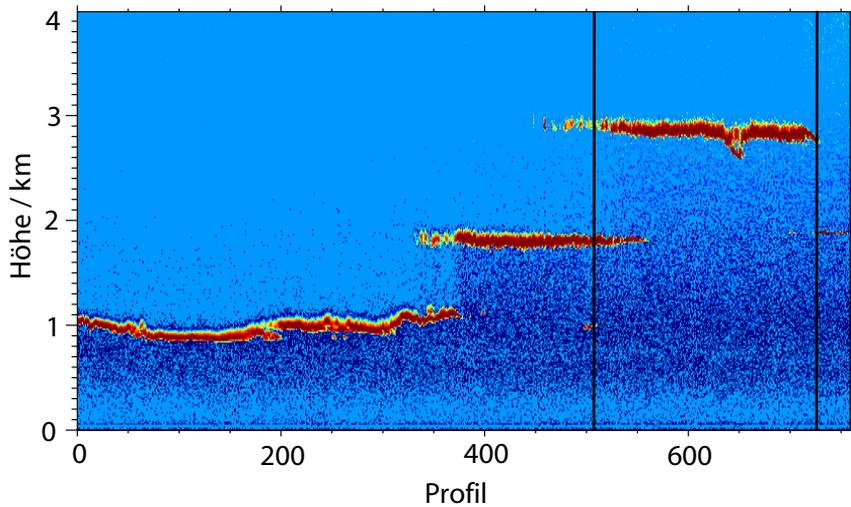


Abbildung 35: Messung vom 14.11.2008 (16:20:10–18:21:20). In der willkürlichen Farbskala wächst die Stärke des Lidarsignals (532 nm, Einfachstreuung) von blau über grün und gelb bis rot. Wolken sind rot zu erkennen. Die Profile zwischen den beiden schwarzen Linien wurden für die Auswertung benutzt.

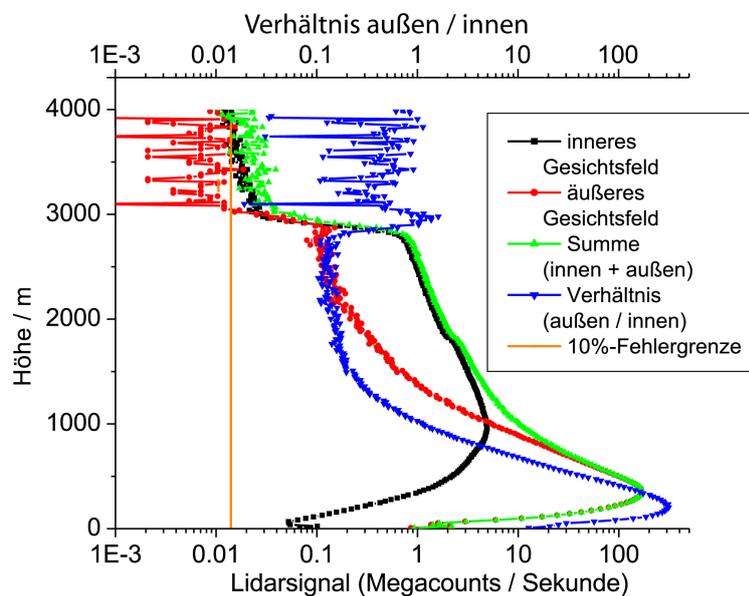


Abbildung 36: Lidarsignale zur Untersuchung der ca. 2.8 km hohen Wolke in der Messung vom 14.11.2008 und Verhältnis aus den Signalen des äußeren und inneren Gesichtsfelds. Beim Unterschreiten der orangenen Linie nehmen die Signale des äußeren bzw. inneren Gesichtsfelds einen statistischen Fehler von über 10% an. Die aufsummierten Profile sind in Abb. 35 gekennzeichnet.

geleitet, die dadurch ein starkes Signal registrieren. Das Verhältnis von reflektiertem zu einfallendem Licht wird durch die Überlappungsfunktion des äußeren Gesichtsfelds beschrieben. Diese ergibt sich aus der Differenz der Überlappungsfunktionen des gesamten, d.h. inneren und äußeren, Gesichtsfelds und des inneren Gesichtsfelds. Abb. 37 zeigt die einzelnen Überlappungsfunktionen, die durch Simulationsrechnungen ermittelt wurden. Dabei wurde mit den in Abschnitt 4.2 angegebenen Parametern des Laserstrahls gearbeitet (0.2 mrad Strahldivergenz, 0.13 mrad Verkippung, gaußförmige radiale Intensitätsverteilung). Die Überlappungsfunktion für das äußere Gesichtsfeld wächst zunächst wegen des steilen Anstiegs der Funktion des großen Gesichtsfelds an. Mit Nachlassen dieses Anstiegs und Zunahme der Überlappungsfunktion des inneren Gesichtsfelds nimmt sie bis in 3 km auf Null ab. Deshalb wird bis in die Höhe, in der die Überlappungsfunktion ihr Maximum erreicht hat, im äußeren Gesichtsfeld auch einfach gestreutes Licht detektiert. Bei der Auswertung der Lidarsignale wurde dies berücksichtigt.

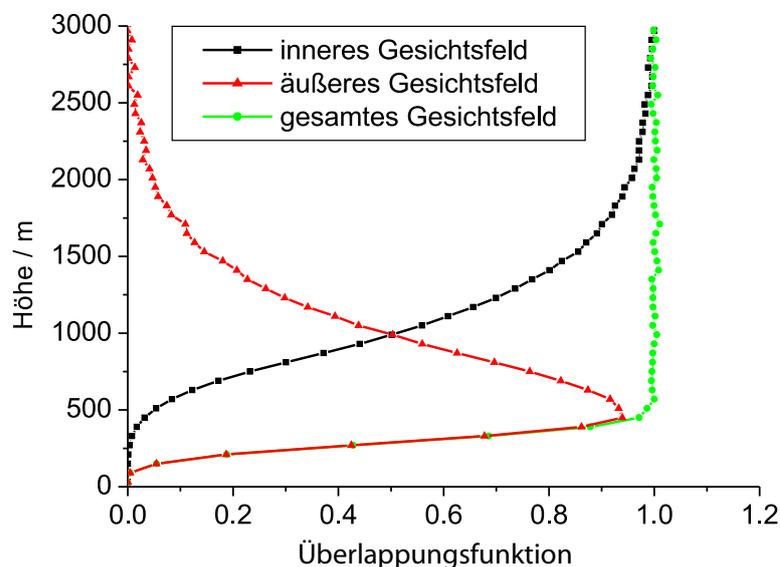


Abbildung 37: Überlappungsfunktionen für das innere, äußere und gesamte Gesichtsfeld bei einer Gesichtsfeldkombination von 0.5/2.0 mrad und Parametern des Laserstrahls wie in Abschnitt 4.2.

Ab einer Höhe von ca. 2.8 m fällt das Signal im inneren Gesichtsfeld stark ab. Die Ursache ist die Schwächung des ausgesandten Laserstrahls durch Streuung innerhalb der Wolke. Durch Vorwärtsstreuung bleibt ein Teil des gestreuten Lichts im äußeren Gesichtsfeld und wird an Stickstoffmolekülen zurückgestreut. Deshalb wird dort oberhalb der Wolkenunterkante zunächst ein Ansteigen des Signals beobachtet. Ab ca. 2.9 km fällt auch das Signal im äußeren Gesichtsfeld, jedoch weniger stark als im inneren. Dementsprechend wächst das Verhältnis aus dem Signal des äußeren zu dem des inneren Gesichtsfelds mit der Eindringtiefe in die Wolke. In ca. 3 km Höhe wird die Oberkante der Wolke erreicht. Der Abfall des Signals des inneren Gesichtsfelds ist dort weniger stark als in der Wolke. Das Signal des äußeren Gesichtsfelds ist dort aufgrund der kleinen Zählraten sehr stark verrauscht. In ca. 1.8 km Höhe zeigt das Signal des inneren Gesichtsfelds einen schwachen Einbruch. Dieser wird durch die entsprechend hohe Wolke (siehe Abb. 35) verursacht, die in den untersuchten Profilen anfangs noch gemessen wird.

5.2 Kalibrierung der Lidarsignale

Die Nachweiskanäle für die Messung mit dem inneren und äußeren Gesichtsfeld haben verschiedene Effizienzen. Zum einen werden in den Kanälen unterschiedliche optische Elemente, PMT-Typen und Datenerfassungen benutzt. Zum anderen wird das einfallende Licht in jedem Kanal mit verschiedenen Neutraldichtefiltern geschwächt, damit unabhängig von den atmosphärischen Bedingungen die Zählraten optimiert werden können. Für den direkten Vergleich der Signale der beiden Gesichtsfelder müssen diese kalibriert werden. Die Kalibrierung wird für jede Messung erneut durchgeführt, da sich die verwendeten Neutraldichtefilter zwischen den Messungen unterscheiden.

Bildet man das Verhältnis der Lidarsignale aus innerem und äußerem Gesichtsfeld P_i/P_a nach Gleichung (3), heben sich die Terme bis auf die System- und Überlappungsfunktionen weg. Die Systemfunktionen unterscheiden sich nur in den Effizienzen η_i und η_a für das innere und äußere Gesichtsfeld, die zur gesuchten Kalibrierkonstante k zusammengefasst werden können. Damit erhält man

$$\frac{P_i(z)}{P_a(z)} = k \frac{O_i(z)}{O_a(z)}, \quad k = \frac{\eta_i}{\eta_a} \quad (28)$$

mit den Überlappungsfunktionen $O_i(z)$ und $O_a(z)$ für das innere und äußere Gesichtsfeld. Die Kalibrierkonstante kann aus dem Verhältnis der gemessenen Lidarsignale und den simulierten Überlappungsfunktionen berechnet werden. Dafür werden die entsprechenden Werte aus dem Höhenbereich von etwa 300 bis 600 m unterhalb der Wolke benutzt. In kleineren Höhen ist das Verhältnis nicht konstant. Die Ursache können Sättigungs- und Abklingeffekte sein. Die Kalibrierkonstante für die Messung am 14.11.2008 von 16:20:10 bis 18:21:20 beträgt 11.1 ± 0.4 . Die Konstante wurde bereits in Abb. 36 bei der Bildung der Summe und der Verhältnisse der Signale aus äußerem und innerem Gesichtsfeld berücksichtigt.

5.3 Ergebnisse

Malinka hat mit dem in Abschnitt 2.4.3 beschriebenen Inversionsalgorithmus die in Abb. 36 gezeigten Signale, die sich aus der Summation der Messungen der Profile 500 bis 727 ergaben, ausgewertet. Dabei wurde die Wolke in 60 m dicke Abschnitte unterteilt. Die Höhe der Wolkenunterkante wurde zu 2752 m bestimmt. Die Ergebnisse der Auswertung sind in Abb. 38 dargestellt. In den unteren 60 m der Wolke wurden kleine Tröpfchen mit einem Radius von unter $1 \mu\text{m}$ ermittelt. Der Radius wächst mit der Eindringtiefe. In 120 bis 180 m oberhalb der Wolkenunterkante beträgt der Tröpfchenradius $4 \mu\text{m}$, in 180 bis 240 m $14 \mu\text{m}$. Der Extinktionskoeffizient nimmt mit der Eindringtiefe von 3.3 km^{-1} in den unteren 60 m der Wolke bis auf 15 km^{-1} zu. Oberhalb von 180 m über der Wolkenunterkante fällt er stark ab. Die vom Inversionsalgorithmus errechneten Lidarsignale konvergierten gegen die gemessenen Signale.

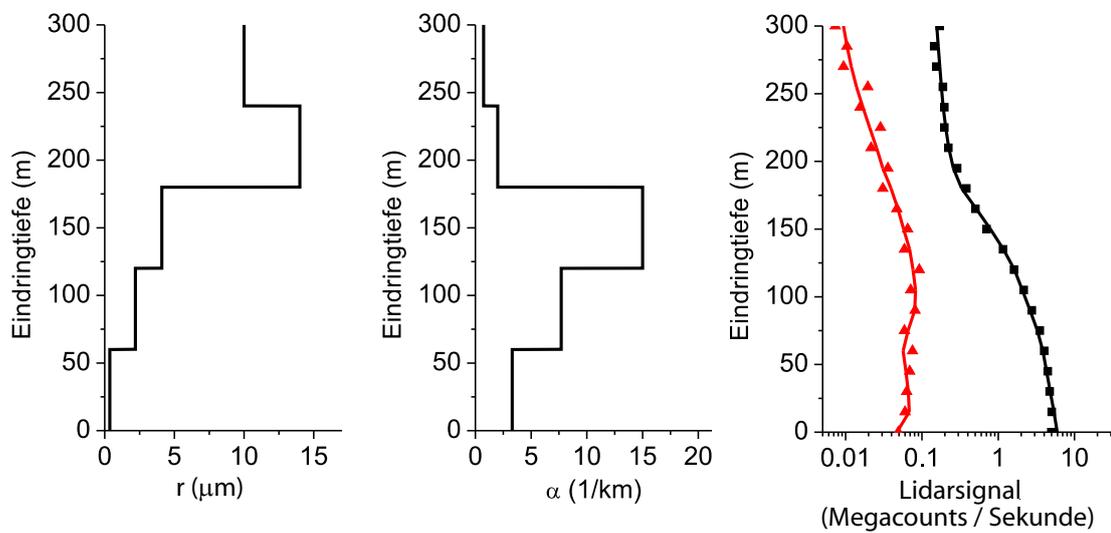


Abbildung 38: Aus der Messung von Profil 500 bis 727 ermittelte effektive Tröpfchenradien (links) und Extinktionskoeffizienten (Mitte). Rechts: Gemessene Lidarsignale im inneren (schwarze Vierecke) und äußeren Gesichtsfeld (rote Dreiecke). Die durchgezogenen Linien sind die von dem Inversionsalgorithmus errechneten Lidarsignale (vgl. Abschnitt 2.4.3).

6 Diskussion

In diesem Kapitel werden die Resultate dieser Diplomarbeit diskutiert. Dazu geht Abschnitt 6.1 auf die durchgeführten Umbauarbeiten am Ramanlidar MARTHA ein. Anschließend werden Messergebnisse behandelt. Eine Diskussion des verwendeten Verfahrens zur Bestimmung der Tröpfchengröße in Wasserwolken folgt. In Abschnitt 6.4 wird das Verfahren bzgl. der Möglichkeiten der Untersuchung des indirekten Aerosol-Effekts mit anderen Methoden verglichen. Ein Ausblick auf weitere mögliche Untersuchungen schließt sich an.

6.1 Empfängeraufbau des Ramanlidars MARTHA

In den Nachweiskanälen für einfach gestreutes Licht werden auf den Photokathoden Strahldurchmesser von ca. 6 mm erreicht (siehe Tabelle 9). Somit kann bei einem effektiven Durchmesser der Kathoden von 7 mm mit einer ausreichenden Justiertoleranz von 0.5 mm das einfallende Licht vollständig auf die Kathoden gebracht werden. Eine Ausnahme bildet der Nachweiskanal 1064 nm mit einem Strahldurchmesser von 6.7 mm auf der Photokathode. Aufgrund der in diesem Kanal größeren Photokathode stellt dies kein Problem dar. Untersuchungen mit dem Strahlverfolgungsprogramm Zemax ergaben, dass mit keiner anderen Konfiguration eines Nachweiskanals ein kleinerer Strahldurchmesser auf der Photokathode bei gleichbleibender Qualität der optischen Abbildung erreicht werden kann. Dass das einfallende Licht die meisten Photokathoden mittig trifft, wurde mit dem Telecover-Test bestätigt. Die in diesem Test festgestellten Justierfehler in den Nachweiskanälen 355 nm und 387 nm wurden behoben.

Anders als in den Nachweiskanälen für einfach gestreutes Licht sind in den Detektionskanälen für Mehrfachstreuung die Strahldurchmesser auf den Photokathoden von der Größe des Gesichtsfelds abhängig (siehe Tabelle 11). Dies resultiert aus der Detektion von mehrfach gestreutem Licht aus dem gesamtem Gesichtsfeld. Damit definiert das Gesichtsfeld die Größe des „Objekts“, das durch die Empfängeroptik auf die Photokathoden abgebildet wird. Im Fall von Einfachstreuung wird nur Licht detektiert, das innerhalb des direkt vom Laser beleuchteten Volumens zurückgestreut wurde. Dann ist das abgebildete Objekt und damit der Strahldurchmesser im Empfänger unabhängig von der Größe des Gesichtsfelds, wenn die Rückstreuung in Höhen stattfindet, in denen die Überlappungsfunktion nicht deutlich unter 1 liegt. Bei der Nutzung des Gesichtsfelds von 3.8 mrad überschreitet in beiden Nachweiskanälen für Mehrfachstreuung der Strahldurchmesser auf den Photokathoden 7 mm. Die Lidarsignale werden dadurch aufgrund der Abbildung des Hauptspiegels auf die Kathoden nicht verfälscht (siehe Abschnitt 3.5.1 und 3.5.2). Der zu große Strahldurchmesser bewirkt lediglich einen Intensitätsverlust des empfangenen Signals. Da das Gesichtsfeld von 3.8 mrad nur bei der Untersuchung von tiefen Wolken verwendet werden soll, sind diese Intensitätsverluste unproblematisch. Wegen des $1/z^2$ -Abfalls des Lidarsignals mit der Höhe [siehe z.B. Gleichung (2)] sind die in kleinen Höhen zurückgestreuten Signale deutlich stärker als die aus größeren Höhen. Damit konnte die in Abschnitt 3.5.2 formulierte Forderung bzgl. der Größe der Strahldurchmesser auf den Photokathoden hinreichend gut erfüllt werden.

Eine weitere Forderung war die Unabhängigkeit des Strahldurchmessers auf den Photokathoden von der Höhe des Rückstreuorts. Die Variation des Durchmessers mit der Rückstreuhöhe beträgt je nach Nachweiskanal zwischen 0.02 und 0.3 mm (siehe Tabelle

12). In den Nachweiskanälen für Einfachstreuung resultiert diese Variation überwiegend aus den für verschiedene Rückstrehhöhen unterschiedlichen Abschattungen des zurückgestreuten Laserlichts an der Feldblende. Diese Abschattungen werden durch die Überlappungsfunktion beschrieben.

Da in den Nachweiskanälen für Mehrfachstreuung die Größe des abzubildenden Objekts direkt von der Feldblende definiert wird, spielen Abschattungen an der Blende dort keine Rolle. Dementsprechend sinkt beim Gesichtsfeld von 2.0 mrad die Variation der Strahldurchmessers auf 1/10 der Werte der Nachweiskanäle für Einfachstreuung. Die deutlich größere Variation im Gesichtsfeld von 3.8 mrad resultiert aus Abbildungsfehlern. Diese werden mit zunehmendem Strahldurchmesser, also Gesichtsfeld, größer. Die Abbildungsfehler bewirken, dass das Bild des Hauptspiegels auf den Photokathoden nicht scharf ist und damit die Unabhängigkeit der Größe des entstehenden Bilds von der Höhe des Rückstreuorts beeinträchtigt wird. Kleine Strahldurchmesser könnten nach Gleichung (24) mit kleineren Kollimatorbrennweiten erreicht werden. Jedoch ergaben Simulationen mit Zemax, dass dann die Qualität der optischen Abbildung deutlich sinkt. Beide Ursachen für die Variation des Strahldurchmessers – die höhenabhängigen Abschattungen an der Feldblende und die großen Strahldurchmesser bzw. Gesichtsfelder – sind grundlegende Eigenschaften des Empfängers und können deshalb nicht vermieden werden. Die relativen Variationen der Strahldurchmesser auf den Photokathoden sind mit 0.3% bis 4% jedoch klein. Dadurch sind keine Auswirkungen auf die Lidarsignale zu erwarten. Die Forderung nach der Unabhängigkeit der Strahldurchmesser auf den Photokathoden von der Rückstrehhöhe wurde gut erfüllt.

Der in Tabelle 13 angegebene Versatz zwischen den Strahlenbündeln unterschiedlicher Einfallrichtungen auf den Photokathoden ist in den Nachweiskanälen für einfach gestreutes Licht sehr klein. Die in Abschnitt 3.5.2 beschriebene optische Abbildung wird damit in den Konfigurationen dieser Kanäle sehr gut umgesetzt. Dies konnte mit dem Telecover-Test bestätigt werden. In den Nachweiskanälen für mehrfach gestreutes Licht sind die Abweichungen ca. eine Größenordnung stärker. Die Ursache sind die größeren Strahldurchmesser und die dadurch verursachten Abbildungsfehler. Dass diese Fehler dennoch klein genug sind, zeigten zum einen die in Abschnitt 3.5.4 beschriebenen Simulationen der Strahlengänge in den Nachweiskanälen für mehrfach gestreutes Licht. Diese ergaben gute Abbildungen des Hauptspiegels auf die Photokathoden. Zum anderen wurden die guten Abbildungen am realisierten Aufbau bestätigt (siehe Abschnitt 3.5.4).

Beim Telecover-Test stimmten die Test-Kurven unterschiedlicher Sektormessungen entweder gut überein oder auftretende Abweichungen konnten erklärt werden. Daraus kann auf eine optimale Justierung des Empfangsteleskops geschlossen werden. Die sehr gute Übereinstimmung von experimentell ermittelter und simulierter Überlappungsfunktion bestätigt dies. Damit wurde eine große Verbesserung gegenüber dem alten Teleskop erreicht, wo Abweichungen von der idealen parabolischen Form den Höhengang der Lidarsignale beeinflussten. Weiterhin wurde mit dem Telecover-Test die gute Justierung der meisten Nachweiskanäle im neuen Empfängeraufbau bestätigt. Eine Ausnahme bildeten die Kanäle 355 nm und 387 nm. Diese wurden bereits neu justiert. Für die Überprüfung der Justierung ist ein erneuter Telecover-Test nötig.

Die sehr gute Realisierung der optischen Abbildung und Justierung von Empfangsteleskop und Strahlseparationseinheit ermöglichen die Ermittlung des Rückstreuoeffizienten bereits ab 500 m Höhe. Damit stellt der Umbau des Empfängers eine herausstechende Verbesserung des Lidars dar.

6.2 Messungen

Bei den in Abb. 35 gezeigten Wolken variiert die Höhe der Wolkenunterkante. Besonders deutlich ist dies bei der ca. 1 km hohen Wolke zu erkennen. Für die Auswertung werden die in einer Auswahl von Höhenprofilen gezählten Photonen summiert. In die Lidargleichung geht der Extinktionskoeffizient $\alpha(z)$ nichtlinear ein [siehe z.B. Gleichung (2)]. Zeitliche Veränderungen der atmosphärischen Bedingungen, besonders der Höhe der Wolkenunterkante, verfälschen dadurch das aufsummierte Lidarsignal [8]. Deshalb ist die Wahl einer Folge von Höhenprofilen günstig, in denen die untersuchte Wolke homogen ist und deren Unterkante in der gleichen Höhe bleibt.

Abb. 39 zeigt die in Abschnitt 5.1 untersuchte Wolke mit einer größeren zeitlichen und räumlichen Auflösung. In den Profilen 635 bis 655 treten starke Veränderungen an der Wolkenunterkante auf. Deren Ursache kann einsetzender Niederschlag sein, der jedoch bereits während des Fallens verdunstet. Weiterhin ist zu erkennen, dass die Wolkenunterkante vor der Niederschlagsbildung ca. 50 m höher ist als danach. Damit Verfälschungen des Signalgangs durch diese Inhomogenitäten vermieden werden, ist es günstig, eine entsprechend kürzere Folge von Höhenprofilen auszuwerten. Eine mögliche Wahl ist der Bereich von Profil 560 bis 610, der in Abb. 39 markiert ist. Er entspricht einer Messdauer von 8:30 Minuten. Die gesamte Wolkenmessung von Profil 500 bis 727 dauerte 38 Minuten.

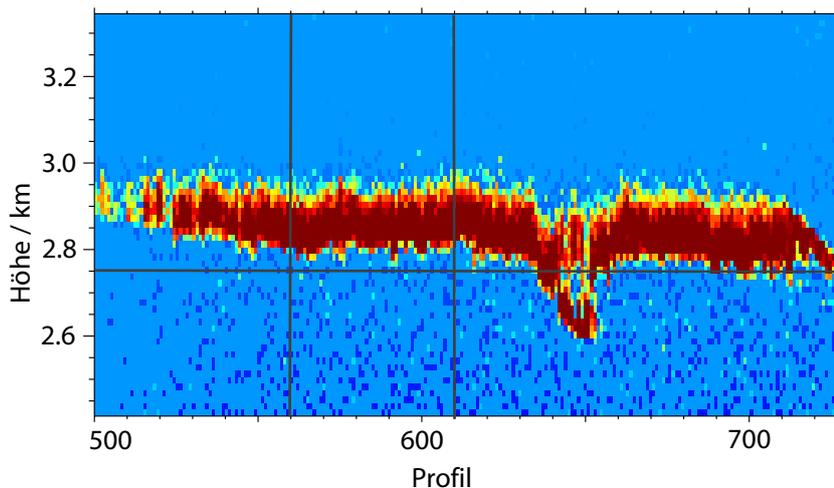


Abbildung 39: Vergrößerte Darstellung der für die Auswertung benutzten Wolke. Gezeigt ist das Lidarsignal für einfach gestreutes Licht bei 532 nm. Die Farbskala entspricht der in Abb. 35. Im markierten Bereich ist die Wolke gut homogen. Die in der Auswertung ermittelte Höhe der Wolkenunterkante von 2752 m (siehe Abschnitt 5.3) ist eingezeichnet.

Die mit einem Lidar in einem Höhenbereich detektierten Photonen können durch eine Poissonverteilung beschrieben werden. Damit beträgt bei \bar{x} gezählten Photonen der relative Fehler σ/\bar{x}

$$\frac{\sigma}{\bar{x}} = \frac{1}{\sqrt{\bar{x}}}. \quad (29)$$

Deshalb ist bei der Auswertung von kürzeren Messungen mit größeren statistischen Fehlern zu rechnen. Abb. 40 zeigt die Lidarsignale, die sich bei der Summation der in Abb. 39

markierten Profile ergeben. Dort ist orange die Zählrate eingezeichnet, bei deren Unterschreitung der statistische Fehler der gemessenen Signale größer als 10% ist. Das Signal des äußeren Gesichtsfelds unterschreitet bereits unterhalb der Wolke diese Zählrate. Das Signal des inneren Gesichtsfelds erreicht diese Zählrate nach einer Eindringtiefe von ca. 100 m in die Wolke. In der 38-minütigen Messung wächst der statistische Fehler des Signals des inneren Gesichtsfelds erst oberhalb der Wolke auf 10% an. Im äußeren Gesichtsfeld wird dieser Fehler näherungsweise an der Wolkenunterkante erreicht (siehe Abb. 36). Zur Reduzierung des statistischen Fehlers wird neben der zeitlichen auch die räumliche Auflösung verringert. So wurde für die Inversion ein räumliches Fenster von 60 m anstatt der Rohdatenauflösung von 15 m benutzt. Die Mittelung über vier Messpunkte entspricht etwa einer Reduktion des Fehlers um den Faktor 2. An dem Beispiel wird deutlich, dass bei der Auswertung von Mehrfachstreu-Messungen ein Kompromiss zwischen der Homogenität der Wolke und dem statistischen Fehler der Lidarsignale gefunden werden muss.

Generell wird es möglich sein, stärkere Signale zu erhalten, wenn im Nachweiskanal für Mehrfachstreuung keine Neutraldichtefilter benutzt werden und dadurch größere Zählraten gemessen werden. Die Signale dieses Kanals erreichten nicht die obere Grenze des Dynamikbereichs, so dass eine Schwächung des einfallenden Lichts nicht nötig ist. Bei der ausgewerteten Messung wurden im Detektionskanal für das äußere Gesichtsfeld Neutraldichtefilter mit der optischen Dicke von insgesamt ca. 0.8 genutzt. Die Höhe der Wolkenunterkante hat ebenfalls einen Einfluss auf die Signalstärke, denn in der Lidargleichung fällt die detektierte Leistung mit der Höhe gemäß $1/z^2$. Damit haben die Signale kleinere statistische Fehler, wenn tiefere Wolken untersucht werden.

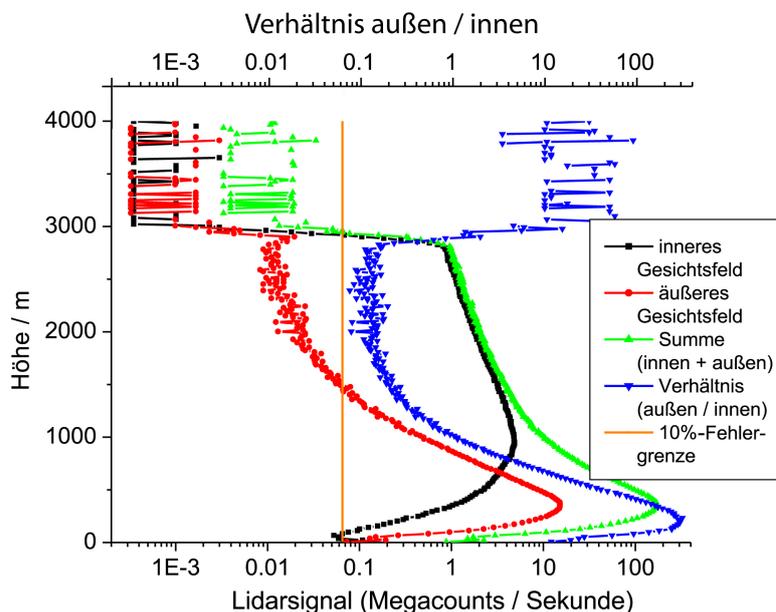


Abbildung 40: Lidarsignale zur Untersuchung der ca. 2.8 km hohen Wolke in der Messung vom 14.11.2008. Die aufsummierten Profile sind in Abb. 35 gekennzeichnet.

Damit die Auswertung der gemessenen Signale mit dem in Abschnitt 2.4.3 beschriebenen Verfahren sinnvoll ist, müssen Wasserwolken untersucht werden. Gefrierprozesse in atmosphärischen Wolken treten erst bei Temperaturen unter $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf. In Abb. 41 sind Temperaturprofile gezeigt, die durch Radiosondenaufstiege ermittelt wurden. Die Radio-

sonden wurden am 15.11.2008 um 0:00 UTC in Lindenberg bei Berlin (52°12' N, 14°7' O) und Meiningen (50°3' N, 10°2' O) gestartet. Leipzig befindet sich etwa zwischen diesen Orten. Die Temperaturprofile bestätigen, dass die untersuchten Wolken tatsächlich Wasserwolken waren.

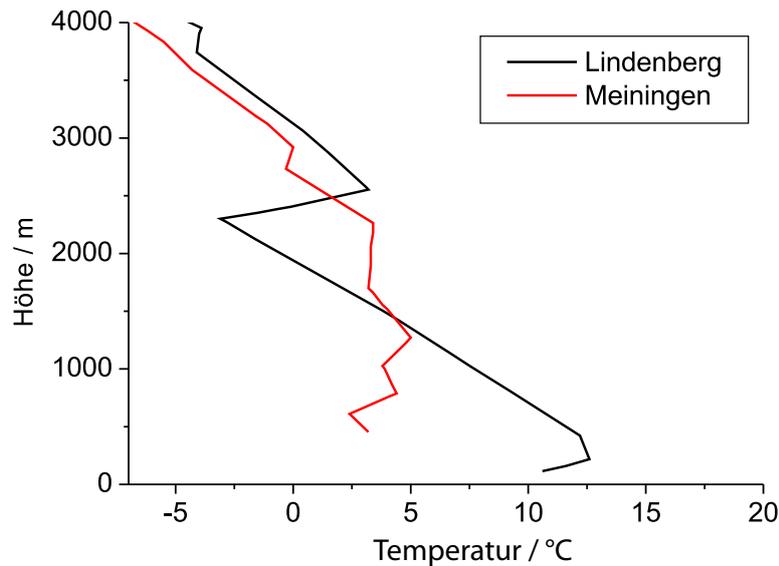


Abbildung 41: Durch Radiosondenaufstiege in Lindenberg und Meiningen ermittelte Temperaturprofile am 15.11.2008 um 0:00 Uhr UTC.

Die ermittelten Extinktionskoeffizienten zwischen 3.3 und 15.0 km⁻¹ in den unteren 180 m der Wolke liegen im erwarteten Bereich. Nach etwa 200 m wurde die Wolke durchdrungen, und der Extinktionskoeffizient fällt in diesem Bereich deutlich ab. Typische Tröpfchenradien liegen zwischen 2 und 30 μm [19]. Der ermittelte effektive Tröpfchenradius von ca. 4 μm in ca. 120 bis 180 m oberhalb der Wolkenunterkante liegt damit im zu erwartenden Bereich und erscheint als sinnvolles Ergebnis. Die Messung von kleineren Tröpfchen im unteren Teil der Wolke kann aus Verdunstungsprozessen an der Wolkenunterkante resultieren. Jedoch ist zu beachten, dass die Höhe der Wolkenunterkante während der Messung variierte (siehe Abb. 39). Nur im letzten Drittel der Messung befand sie sich in der Höhe der mit dem Inversionsalgorithmus bestimmten Wolkenunterkante von 2752 m. Die Veränderungen in der Höhe der Wolkenunterkante können durch die nichtlineare Lidargleichung das ermittelte Signal besonders im unteren Teil der Wolke systematisch verfälschen. Die ermittelte Tröpfchengröße von 14 μm oberhalb von 180 m liegt im Bereich möglicher Werte. Wegen der geringen Signalstärken sind hier aber große Fehler zu erwarten. Eine ausführliche Fehleranalyse für den Inversionsalgorithmus steht noch aus.

6.3 Verwendetes Verfahren zur Bestimmung von Tröpfchengrößen in Wolken

Bissonnette et al. konnten durch Lidarmessungen mit mehreren Gesichtsfeldern den effektiven Radius von Wolkentröpfchen ermitteln. Dabei arbeiteten sie mit vier bzw. 32 unterschiedlichen Gesichtsfeldern [28, 29, 30, 31]. In diesen Verfahren wird elastisch gestreutes Licht detektiert, was bedeutet, dass auch der Rückstreuvorgang nahe 180° an Wolkentröpfchen stattfindet. Dadurch wird die Berechnung des effektiven Tröpfchenradius aus den gemessenen Lidarsignalen durch die anisotrope und nicht monotone Phasenfunktion für den Rückstreuvorgang (siehe Abb. 3) stark erschwert. Die Anisotropie der Phasenfunktion bewirkt unterschiedliche Effizienzen für die Rückstreuung von Photonen bei unterschiedlichen Winkelauslenkungen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde erstmals Licht, das in Wolken mehrfach gestreut und anschließend an Stickstoffmolekülen inelastisch zurückgestreut wurde, mit einem Lidar mit mehreren Gesichtsfeldern detektiert. Dadurch konnte das von Malinka und Zege vorgeschlagene Verfahren zur Ermittlung des Extinktionskoeffizienten und effektiven Tröpfchenradius in Wasserwolken implementiert werden. Da bei Ramanstreuung die Streuphasenfunktion weitgehend isotrop ist (siehe Abb. 3), hängt die Effizienz der Rückstreuung nicht von der Winkelauslenkung ab. Damit vereinfacht sich der zur Auswertung benutzte Inversionsalgorithmus. Der Nachteil dieses Verfahrens ist, dass die Ramansignale deutlich schwächer sind als Signale von elastisch gestreutem Licht. Die damit verbundenen größeren statistischen Fehler wurden in Abschnitt 6.2 diskutiert.

6.4 Ausblick: Untersuchung des indirekten Aerosol-Effekts

In der Einleitung der vorliegenden Arbeit wurde bereits erwähnt, dass der bisher schlecht verstandene indirekte Aerosol-Effekt bei den Betrachtungen der globalen Klimaveränderung nicht vernachlässigt werden darf. Dieser beschreibt die Zunahme der Konzentration der Wolkentröpfchen bei einem größeren Gehalt von Aerosolpartikeln und damit Kondensationskeimen. Bei konstantem Wassergehalt der Wolke nimmt damit der effektive Radius der Wolkentröpfchen ab. Dies führt zu einer Zunahme der Albedo der Wolke und hat dadurch einen Einfluss auf die Strahlungsbilanz der Erde, was als Twomey-Effekt bezeichnet wird [32]. Die Stärke dieses Effekts hängt, neben der Stärke der Konvektion und der Aerosolkonzentration, von den Eigenschaften der Aerosole wie der Größenverteilung und der chemischen Zusammensetzung ab [33]. Im IPCC-Bericht (**I**ntergovernmental **P**anel on **C**limate **C**hange) von 2007 wurde das wissenschaftliche Verständnis dieses Effekts als „gering“ eingeschätzt, dessen Einfluss auf die globale Strahlungsbilanz jedoch als „mittel“ [34]. Eine weitere Auswirkung einer erhöhten Aerosolkonzentration und damit kleineren Wolkentröpfchen kann die Verzögerung der Niederschlagsbildung sein. Dies würde die Lebensdauern der Wolken verlängern [35]. Der sogenannte halb-direkte Aerosol-Effekt beschreibt einen weiteren Einfluss von Aerosolen auf Wolken durch die Absorption von Sonnenstrahlung an Aerosolen. Die damit verbundene Erwärmung der entsprechenden Luftschichten führt zur Zunahme der Verdunstung von Wolken. Außerdem nimmt die Stabilität der Atmosphäre zu, wodurch die konvektive Bildung von Wolken behindert wird [36, 37]. Das wissenschaftliche Verständnis des Einflusses des Aerosols auf die Lebensdauer von Wolken und des halb-direkten Aerosol-Effekts wird im IPCC-Bericht als „sehr schlecht“ eingestuft [34]. Die Einflüsse dieser Prozesse auf die globale Strahlungsbilanz werden als „mittel“ bzw. „gering“ eingeschätzt [34].

Es gibt vielfältige Ansätze zur Untersuchung des indirekten Aerosol-Effekts. Mit flugzeuggestützten In-situ-Messungen können genaue Daten über Aerosole und mikrophysikalische Eigenschaften von Wolken gewonnen werden [38]. Jedoch sind diese Studien auf die Untersuchung weniger Einzelfälle beschränkt und lassen sich nicht für die Erstellung aussagekräftiger Statistiken nutzen. Durch Fernerkundung mit Satelliten konnten Zusammenhänge zwischen der optischen Dicke von Aerosolschichten und der Wolkenalbedo hergestellt werden [39]. Jedoch stehen dabei die Aerosolinformationen nicht höhenaufgelöst zur Verfügung. Deshalb sind unter Umständen die ermittelten Aerosoleigenschaften nicht repräsentativ für die Aerosole in den beobachteten Wolken.

Mit Lidarmessungen ist es hingegen möglich, Eigenschaften von Aerosolen zeitlich und räumlich hochaufgelöst zu ermitteln. Mehrfachstreuungsmessungen mit dem Ramanlidar MARTHA können mit einer Höhenauflösung von bis zu 15 m durchgeführt werden. Die Messgrößen, die mit dem Ramanlidar MARTHA bestimmt werden können, wurden in Abschnitt 3.1 aufgeführt. Darüber hinaus ist es möglich, mit einem Inversionsverfahren Aussagen über mikrophysikalische Eigenschaften von Aerosolen, z.B. den effektiven Radius, abzuleiten [40, 41]. Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Umbauarbeiten ermöglichen die gleichzeitige Untersuchung von Wolkeneigenschaften. Damit ist das Ramanlidar MARTHA ein ideales Gerät zur Erforschung des Einflusses von Aerosolen auf Wolken. Eine Langzeitstudie zur Korrelation von Aerosol- und Wolkeneigenschaften ist möglich und sinnvoll.

Darüber hinaus betreibt das IfT das Doppler-**Windlidar** WiLi. Mit diesem ist die Untersuchung von Vertikalwindgeschwindigkeiten und Turbulenzen unterhalb von Wolken möglich. Damit können Aussagen über den Aerosolfluss vom Boden bis zur Wolkenunterkante gewonnen werden. Die Vertikalbewegung wird als weiterer wichtiger Parameter für das Verständnis des indirekten Aerosol-Effekts angesehen [42]. Messungen mit dem Windlidar WiLi stellen daher eine ideale Ergänzung von Langzeitstudien mit dem Ramanlidar MARTHA dar.

Wolken werden routinemäßig mit Hilfe der Radartechnik (**R**adio **D**etection and **R**anging) untersucht. Die Bestimmung von Wolkentropfenradien mittels Radar ist jedoch besonders an der Wolkenunterkante schwierig. Größere Tropfen, die aus der Wolke ausfallen (engl. drizzle), dominieren das Radarsignal an der Wolkenunterkante und erschweren damit die Bestimmung der Wolkeneigenschaften [43, 44]. Dieses Problem wird bei Lidarmessungen vermieden. Dadurch bieten kombinierte Lidar-Radar-Messungen sehr gute Möglichkeiten zur Bestimmung von Wolkeneigenschaften. Mit einem Lidar können Informationen an der Wolkenbasis gewonnen werden. Mit einem Radar wird die Ermittlung von Wolkeneigenschaften in größeren Eindringtiefen ermöglicht.

7 Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden umfangreiche Umbauarbeiten am Ramanlidar MARTHA durchgeführt. Unter anderem wurde das Lidar um zwei Detektionskanäle für Mehrfachstreuung erweitert. Damit konnte erstmals mit einem Lidar winkelabhängig Licht detektiert werden, das in Wolken mehrfach gestreut und an Stickstoffmolekülen inelastisch zurückgestreut wurde. Dadurch war es möglich, mit einem von Malinka und Zege entwickeltem Inversionsverfahren Tröpfchengrößen und Extinktionskoeffizienten in Wasserwolken zu bestimmen.

Im ersten Teil der Arbeit erfolgten zahlreiche Umbauarbeiten am Ramanlidar MARTHA. Es wurde ein neues Empfangsteleskop eingebaut und justiert. Entsprechend den Empfehlungen von Malinka und Zege [3] wurden günstige Gesichtsfeldkombinationen für die Detektion von einfach und mehrfach gestreutem Licht berechnet. Dabei ist die Wahl der Gesichtsfeldkombination für eine Messung von der Höhe der Wolkenunterkante abhängig. Mit den gefertigten drei Blenden lassen sich Wolken, deren Unterkanten zwischen 0.7 und 5.5 km Höhe liegen, untersuchen. Dies entspricht dem Höhenbereich, in dem über Leipzig Wasserwolken zu erwarten sind. Die Realisierung der Gesichtsfelder erfolgte durch Spiegelblenden. Durch die Verwendung dieser Blenden kommt es nicht zu Intensitätsverlusten bei der Trennung des Lichts der beiden Gesichtsfelder. Durch Simulationen aller Nachweiskanäle der Strahlseparationseinheit mit dem Strahlverfolgungsprogramm Zemax konnten die Kanäle optimiert werden. Entsprechend der Ergebnisse der Simulationen wurde die Strahlseparationseinheit neu aufgebaut, justiert und um zwei Detektionskanäle für mehrfach gestreutes Licht erweitert. Die Umbauarbeiten ermöglichten die Veränderung des Prinzips des Strahlengangs in den Nachweiskanälen. Im neuen Aufbau wird der Hauptspiegel des Teleskops auf die Photokathoden abgebildet. Dadurch sind die Durchmesser der einfallenden Lichtbündel auf den Photokathoden nicht von der Rückstreuhöhe in der Atmosphäre abhängig, was zu einer Reduktion von systematischen Effekten in den Lidarsignalen führt. Die Überprüfung der optischen Abbildung mit dem Strahlverfolgungsprogramm Zemax ergab, dass die erzeugten optischen Abbildungen die notwendige Größe und eine gute Qualität haben. Weiterhin zeigten Untersuchungen mit Zemax, dass die realisierten Konfigurationen der Nachweiskanäle in ihrer Abbildungsqualität und Größe der optischen Abbildung nicht von anderen Konfigurationen übertroffen werden können.

Nach Abschluss der Umbauarbeiten wurde die Qualität des neuen Empfängeraufbaus überprüft. Der Telecover-Test bestätigte die sehr gute Justierung des Empfangsteleskops und die optimale Realisierung der optischen Abbildung des Hauptspiegels. Weiterhin wurde die Justierung der Strahlseparationseinheit mit dem Test überprüft und daraufhin für zwei Nachweiskanäle korrigiert. Der Test ergab außerdem, dass oberhalb von einer Höhe von 3 km die Überlappungsfunktion keinen Einfluss auf die Lidarsignale hat. Bereits oberhalb von 2 km ist der Einfluss der Überlappungsfunktion sehr klein. Ab einer Höhe von 500 m können Signalverhältnisse ausgewertet werden, ohne Korrekturfunktionen zu benutzen. Der Vergleich der Ergebnisse des Telecover-Tests für den alten und den neuen Empfängeraufbau demonstrierte eine deutliche Verbesserung der Qualität des Empfängers. Es konnte begründet werden, dass die Verbesserung aus dem Einbau des neuen Empfangsteleskops sowie dem neuen Prinzip des Strahlengangs in der Strahlseparationseinheit resultiert.

Weiterhin wurde die Überlappungsfunktion durch Simulationen und Messungen bestimmt. Die Ergebnisse zeigten eine sehr gute Übereinstimmung, die in dieser Qualität,

nach dem vorliegenden Literaturwissen, noch nie erreicht wurde. Entsprechend kann davon ausgegangen werden, dass die ermittelte Überlappungsfunktion das tatsächliche Systemverhalten sehr gut beschreibt und der simulierte Empfängeraufbau sehr gut mit dem realisierten Aufbau übereinstimmt. Anhand von Simulationen konnte gezeigt werden, dass die Nutzung von Spiegelblenden keinen Einfluss auf die Signale von einfach gestreutem Licht hat. Aufgrund der großen Gesichtsfelder bei der Untersuchung von Mehrfachstreuung kommt es in den entsprechenden Nachweiskanälen zu größeren Einfallswinkeln auf den optischen Elementen. Durch Simulationen und Abschätzungen des Herstellers konnte bestätigt werden, dass alle Einfallswinkel im Akzeptanzbereich der verwendeten Elemente liegen.

Mit dem umgebauten Ramanlidar wurden acht Wolken in Höhen zwischen 0.8 und 3 km untersucht. Malinka hatte eine Messung exemplarisch ausgewertet. Anhand dieser Messung wurde das typische Signalverhalten erläutert. Auf die Kalibrierung der Lidarsignale und deren statistischen Fehler wurde eingegangen. Daran konnte verdeutlicht werden, dass möglichst lange Messungen nötig sind, um den statistischen Fehler der intensitätsschwachen Ramansignale klein zu halten. Dies steht jedoch im Konflikt zu der Forderung, möglichst homogene Wolken zu untersuchen. Bei der 38-minütigen Untersuchung einer 2.8 km hohen Wolke betrug der statistische Fehler des Signals des äußeren Gesichtsfeld ca. 10% an der Wolkenunterkante. Verbesserungsvorschläge zur Verringerung des statistischen Fehlers wurden in Abschnitt 6.2 diskutiert.

Mit der neuen Konfiguration des Ramanlidars MARTHA können Aerosol- und Wolkeneigenschaften gleichzeitig und mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung bestimmt werden. Damit ist die Untersuchung des indirekten Aerosol-Effekts durch Lidarmessungen auf der Basis aussagekräftiger Langzeitstatistiken möglich. Darüber hinaus stellen Messungen des Vertikalwinds und des vertikalen Aerosolflusses vom Boden in die Wolken mit dem Doppler-Windlidar WiLi am IfT eine sinnvolle Ergänzung einer solchen Studie dar. Das IfT verfügt damit über ein weltweit einzigartiges Instrumentarium zur Erforschung klimarelevanter atmosphärischer Prozesse.

Literatur

- [1] IPCC, 2007: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden and C. E. Hanson, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2007
- [2] MALINKA, A. V. ; ZEGER, E. P.: Using multiple scattering in Raman lidar sounding of warm clouds. In: *Proceedings of the Sixth International Symposium on Tropospheric Profiling: Needs and Technologies*. Leipzig, Deutschland, 14.-20. September 2003
- [3] MALINKA, A. V. ; ZEGER, E. P.: Possibilities of warm cloud microstructure profiling with multiple-field-of-view Raman lidar *Appl. Opt.* 46 (2007), S. 8419–8427
- [4] KLETT, J. D.: Stable analytical inversion solution for processing lidar returns *Appl. Opt.* 20 (1981), S. 211–220
- [5] SASSEN, K.: Polarization in Lidar. In: WEITKAMP, C. (Hrsg.): *Lidar - Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere*. Springer, 2005, Kap. 2, S. 19–42
- [6] MURAYAMA, T. ; MÜLLER, D. ; WADA, K. ; SHIMIZU, A. ; SEKIGUCHI, M. ; TSUKAMOTO, T.: Characterization of Asian dust and Siberian smoke with multiwavelength Raman lidar over Tokyo, Japan in spring 2003 *Geophys. Res. Letters* 31 (2004), D02305, doi:10.1029/2004GL021105
- [7] ANSMANN, A. ; RIEBESELL, M. ; WEITKAMP, C.: Measurement of atmospheric aerosol extinction profiles with a Raman lidar *Opt. Lett.* 15 (1990), S. 746–748
- [8] ANSMANN, A. ; WANDINGER, U. ; RIEBESELL, M. ; WEITKAMP, C. ; MICHAELIS, W.: Independent measurement of extinction and backscatter profiles in cirrus clouds by using a combined Raman elastic-backscatter lidar *Appl. Opt.* 31 (1992), S. 7113–7113
- [9] ARSHINOV, Y. ; BOBROVNIKOV, S. ; SERIKOV, I. ; ANSMANN, A. ; WANDINGER, U. ; ALTHAUSEN, D. ; MATTIS, I. ; MULLER, D.: Daytime operation of a pure rotational Raman lidar by use of a Fabry-Perot interferometer *Appl. Opt.* 44 (2005), S. 3593–3603
- [10] COONEY, J.: Remote measurements of atmospheric water vapor profiles using the Raman component of laser backscatter *J. Appl. Meteorol.* 9 (1970), S. 182–184
- [11] MATTIS, I. ; ANSMANN, A. ; ALTHAUSEN, D. ; JAENISCH, V. ; WANDINGER, U. ; MÜLLER, D. ; ARSHINOV, Y. F. ; BOBROVNIKOV, S. M. ; SERIKOV, I. B.: Relative-humidity profiling in the troposphere with a Raman lidar *Appl. Opt.* 41 (2002), S. 6451–6462
- [12] WANDINGER, U.: *Theoretische und experimentelle Studien zur Messung stratosphärischen Aerosols sowie zum Einfluss der Mehrfachstreuung auf Wolkenmessungen mit einem Polarisations-Raman-Lidar*, Universität Hamburg, Dissertation, 1994

- [13] BISSONNETTE, L. R.: Lidar and Multiple Scattering. In: WEITKAMP, Claus (Hrsg.): *Lidar - Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere*. Springer, 2005, Kap. 3, S. 43–104
- [14] PAL, S. R. ; CARSWELL, A. I.: Multiple scattering in atmospheric clouds: Lidar observations *Appl. Opt.* 15 (1976), S. 1990–1995
- [15] PLATT, C. M. R.: Lidar and radiometric observations of cirrus clouds *J. Atmos. Sc.* 30 (1973), S. 1191–1204
- [16] WANDINGER, U.: Multiple-scattering influence on extinction- and backscatter-coefficient measurements with Raman and high-spectral-resolution lidars *Appl. Opt.* 37 (1998), S. 417–427
- [17] MALINKA, A. V. ; ZEGER, E. P.: Analytical modeling of Raman lidar return, including multiple scattering *Appl. Opt.* 42 (2003), S. 1075–1080
- [18] GREIN, M.: *Charakterisierung und Erweiterung der Empfängeroptik des IFT-Ramanlidars MARTHA für kombinierte Aerosol- und Wolkenmessungen*, Universität Leipzig, Diplomarbeit, 2006
- [19] PRUPPACHER, H. R. ; KLETT, J. D.: *Microphysics of Clouds and Precipitation*. Dodrecht, NL : Kluwer Academic Publishers, 1980
- [20] ANSMANN, A. ; TESCHE, M. ; ALTHAUSEN, D. ; MÜLLER, D. ; SEIFERT, P. ; FREUDENTHALER, V. ; HEESE, B. ; WIEGNER, M. ; PISANI, G. ; KNIPPERTZ, P. ; DUBOVIK, O.: Influence of Saharan dust on cloud glaciation in southern Morocco during the Saharan Mineral Dust Experiment *J. Geophys. Res.* 113 (2008), D04210, doi:10.1029/2007JD008785
- [21] WANDINGER, U. ; ANSMANN, A.: Experimental determination of the lidar overlap profile with Raman lidar *Appl. Opt.* 41 (2002), S. 511–514
- [22] MATTIS, I.: *Aufbau eines Feuchte-Temperatur-Aerosol-Ramanlidars und Methodenentwicklung zur kombinierten Analyse von Trajektorien und Aerosolprofilen*, Universität Leipzig, Dissertation, 2002
- [23] EDMUND OPTICS: *Optical Flat Manual*, 2004
- [24] SIMEONOV, V. ; LARCHEVEQUE, G. ; QUAGLIA, P. ; BERGH, H. van den ; CALPINI, B.: Influence of the photomultiplier tube spatial uniformity on lidar signals *Appl. Opt.* 38 (1999), S. 5186–5190
- [25] FREUDENTHALER, V.: Effects of spatially inhomogeneous photomultiplier sensitivity on lidar signals and remedies. In: *Proceedings of the 22nd International Laser Radar Conference*. Matera, Italy, 12.-16. Juli 2004
- [26] FREUDENTHALER, V.: The Telecover Test: A quality assurance tool for the optical part of a Lidar system. In: *Proceedings of the 24th International Laser Radar Conference*. Boulder, USA, 23.-27. Juni 2008

-
- [27] WANDINGER, U.: Raman Lidar. In: WEITKAMP, C. (Hrsg.): *Lidar - Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere*. Springer, 2005, Kap. 2, S. 241–272
- [28] BISSONNETTE, L. R. ; HUTT, D. L.: Multiple scattering lidar *Appl. Opt.* 29 (1990), S. 5045–5046
- [29] BISSONNETTE, L. R. ; HUTT, D. L.: Multiply scattered aerosol lidar returns: Inversion method and comparison with in situ measurements *Appl. Opt.* 34 (1995), S. 6959–6975
- [30] BISSONNETTE, L. R. ; ROY, G. ; POUTIER, L. ; COBER, S. G. ; ISAAC, G. A.: Multiple-scattering lidar retrieval method: Tests on Monte Carlo Simulations and comparisons with in situ measurements *Appl. Opt.* 41 (2002), S. 6307–6324
- [31] BISSONNETTE, L. R. ; ROY, G. ; ROY, N.: Multiple-scattering-based lidar retrieval: Method and results of cloud probings *Appl. Opt.* 44 (2005), S. 5565–5581
- [32] TWOMEY, S.: Influence of pollution on shortwave albedo of clouds *J. Atmos. Sc.* 34 (1977), S. 1149–1152
- [33] DUSEK, U. ; FRANK, G. P. ; HILDEBRANDT, L. ; CURTIUS, J. ; SCHNEIDER, J. ; WALTER, S. ; CHAND, D. ; DREWNICK, F. ; HINGS, S. ; JUNG, D. ; BORRMANN, S. ; ANDREAE, M. O.: Size matters more than chemistry for cloud-nucleating ability of aerosol particles *Science* 312 (2006), S. 1375–1378
- [34] INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE: *Climate Change 2007 - The Physical Science Basis*. Cambridge, UK : Cambridge University Press, 2007
- [35] ALBRECHT, B.: Aerosols, cloud microphysics and fractional cloudiness *Science* 245 (1989), S. 1227–1230
- [36] ACKERMAN, A. S. ; TOON, O. B. ; STEVENS, D. E. ; HEYMSFIELD, A. J. ; RAMANATHAN, V. ; WELTON, E. J.: Reduction of tropical cloudiness by soot *Science* 288 (2000), S. 1042–1047
- [37] COOK, J. ; HIGHWOOD, E. J.: Climate response to tropospheric absorbing aerosols in an intermediate general-circulation model *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 130 (2004), S. 175–191
- [38] BRENGUIER, J. L. ; CHUANG, P. Y. ; FOUQUART, Y. ; JOHNSON, D. W. ; PAROL, F. ; PAWLOWSKA, H. ; PELON, J. ; SCHULLER, L. ; SCHRODER, F. ; SNIDER, J.: An overview of the ACE-2 CLOUDYCOLUMN closure experiment *Tellus* 52 (2000), S. 815–827
- [39] KAUFMAN, Y. J. ; NAKAJIMA, T.: Effect of Amazon smoke on cloud microphysics and albedo - analysis from satellite imagery *J. Appl. Meteorol.* 32 (1993), S. 729–744
- [40] MÜLLER, D. ; WANDINGER, U. ; ANSMANN, A.: Microphysical particle parameters from extinction and backscatter lidar data by inversion with regularization: Theory *Appl. Opt.* 38 (1999), S. 2346–2357
-

- [41] MÜLLER, D. ; WANDINGER, U. ; ALTHAUSEN, D. ; FIEBIG, M.: Comprehensive particle characterization from three-wavelength Raman-lidar observations: Case study *Appl. Opt.* 40 (2001), S. 4863–4869
- [42] FEINGOLD, G.: Modeling of the first indirect effect: Analysis of measurement requirements *Geophys. Res. Lett.* 30 (2003), 1997, doi:10.1029/2003GL017967
- [43] CONNOR, E. J. ; ILLINGWORTH, A. J. ; HOGAN, R. J.: A technique for autocalibration of cloud lidar *J. Atmos. and Oceanic Technol.* 21 (2004), S. 777–786
- [44] CONNOR, E. J. ; HOGAN, R. J. ; ILLINGWORTH, A. J.: Retrieving stratocumulus drizzle parameters using Doppler radar and lidar *J. Appl. Meteorol.* 44 (2005), S. 14–27

Danksagung

Diese Diplomarbeit wäre nicht ohne die Unterstützung anderer Personen möglich gewesen. Diese ermöglichten mir ein schönes, interessantes und lehrreiches Jahr am Leibniz-Institut für Troposphärenforschung in Leipzig.

Ich möchte mich bei Frau Dr. Ulla Wandinger bedanken. Sie betreute die Arbeit, gab mir wichtige Anregungen und Hilfestellungen und half mir neue Sachverhalte zu verstehen. Außerdem war mir ihr intensives Korrekturlesen eine riesige Hilfe.

Ich danke Herrn Prof. Dr. Herbert Stafast für die Betreuung der Arbeit von Jena aus. Die Anmerkungen und Korrekturvorschläge zur Arbeit haben mir sehr geholfen.

Ich bedanke mich bei Dr. Aleksey V. Malinka für die Zusammenarbeit und die Auswertung einer Messung mit seinem Inversionsalgorithmus. Außerdem war es für mich sehr interessant, seine abstrakte und mathematische Betrachtungsweise der Lidartechnik kennenzulernen.

Allen Mitarbeitern der Lidargruppe am IfT sei gedankt. Die vielen kleinen Hilfen und Erklärungen waren eine große Unterstützung für mich. Außerdem halfen mir zahlreiche Erörterungen, die Welt der Meteorologie ein Stück weit zu verstehen. Besonders möchte ich mich bei Ronny Engelmann bedanken. Durch Erklärungen, aber vor allem gemeinsames Hantieren im Labor habe ich viel dazugelernt.

Den Mitarbeitern der Werkstatt, besonders Cornelia Kurze, bin ich für die vielen präzisen Arbeiten, die zum Umbau von MARTHA nötig waren, dankbar.

Für das Gelingen einer solchen Arbeit ist natürlich ein angenehmes soziales Umfeld nötig. Daher danke ich meiner Freundin Luise nicht nur für das Korrekturlesen der Arbeit, sondern vor allem für Liebe, Verständnis und Ablenkung von der Arbeit. Meinen Freunden in Leipzig, Jena und an anderen Orten dieser Welt sei gedankt. Hier möchte ich auch meine WG erwähnen. Auch bin ich den Gruppen und Initiativen dankbar, bei denen ich mich neben der Arbeit austoben konnte, um gemeinsam für eine bessere Welt zu streiten. Dies waren vor allem die Sambagruppe MAGDA, die Leipziger Clownsarmee und die Bürgerinitiative Buntes Reudnitz. Meinen Eltern und Geschwistern möchte ich ebenfalls danken.

Erklärung

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

.....

Ort, Abgabedatum

.....

Unterschrift des Verfassers

Seitens des Verfassers/Verfasserin bestehen keine Einwände, die vorliegende Diplomarbeit für die öffentliche Nutzung in der Thüringer Universitäts- und Landesbibliothek zur Verfügung zu stellen.

.....

.....

Unterschrift