

Auswirkung der Teleskop-Überlappfunktion auf die Datenqualität eines Rayleigh/Mie/Raman-Lidar Instruments

Bachelorarbeit
zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Science

vorgelegt von
Jan Grzegorzewski
geboren in Goslar

Institut für Atmosphärenphysik angefertigt am Institut für Physik Uni Rostock
2013

1. Gutachter : Prof. Dr. Franz-Josef Lübken, Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik
2. Gutachter : Dr. G. Baumgarten, Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik

Datum des Einreichens der Arbeit: 30. August 2013

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit behandelt die Auswirkungen der Teleskop-Überlappfunktion auf die Datenqualität bei dem ALOMAR-RMR-Lidar in Norwegen. Die Daten wurden über das Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik e. V. an der Universität Rostock erhoben. Die Untersuchung befasst sich mit Laserpulsen, welche an der Atmosphäre gestreut werden. Diese Strahlenbündel, welche das Lidar verlassen, divergieren, wodurch sich die sogenannte Streuscheibe, abhängig von der Streuhöhe in der Atmosphäre, vergrößert. Das Gesichtsfeld des Teleskops muss also so gewählt werden, dass die Streuscheibe innerhalb des Akzeptanzradiuses des Teleskopblickfelds liegt. Ziel dessen ist, einen möglichst kleinen Untergrund und damit eine hohe Datenqualität zu gewährleisten. Die Streuscheibe soll dabei möglichst ein Großteil des Teleskopblickfelds ausfüllen. Die Untersuchung erschwerend, kann das Teleskop nicht auf die jeweiligen Streuhöhen fokussiert werden, da innerhalb der kurzen Laufzeiten des Lichts eine so schnelle Fokussierung durch Bewegung der Faser technisch nicht umsetzbar ist. Daraus resultiert eine höhenabhängige Transmission des Instruments, welche durch die Überlappfunktion beschrieben wird.

Aus einem Fit (bestimmt mithilfe von theoretischen Werten, welche durch ein Raytraceverfahren gewonnen wurden) wurde eine Abschätzung der Empfangsfaserfehlfokussierung (+1mm für die 1,5mm Faser und +2mm für 0,8mm Faser) des SET durchgeführt. Als weiteres Ergebnis wurde die Unzulänglichkeit des theoretischen Modells im Teleskopnahfeld festgestellt. Dadurch sollte die Abschätzung der Empfangsfaserfehlfokussierung mit Einschränkungen betrachtet werden.

Die Untersuchung ergibt des weiteren, dass das Signal-Rausch-Verhältnis (resultierend aus der Überlappfunktion) bei der 0,8mm Faser um das zweifache besser ist als bei der 1,5mm Faser.

Letztendlich wurde eine bessere Fokussierung des NWTs festgestellt.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	X
1 Einleitung	1
1.1 Übersicht	1
1.2 Gliederung der Arbeit	3
2 Aufbau des Experiments	4
2.1 ALOMAR-RMR-Lidar	4
2.2 Instrumentelle Komponenten	5
2.2.1 Besonderheiten des Transferzweig	6
3 Theoretische Grundlagen	10
3.1 hydrostatische Integration	10
3.2 Streumechanismen	11
3.2.1 Cabannes-/Rotations-Raman-/Streuung	11
3.2.2 Mie-Streuung	12
3.3 Lidargleichung	12
3.3.1 Die Überlappfunktion	13
3.3.2 Der Untergrund	15
4 Datenanalyse	17
4.1 Methode	17
4.1.1 Vorgehen bei der Messdatenaufnahme	17
4.1.2 Vorgehen bei der Analyse der Messdaten	18
4.2 Veranschaulichungen der Messdatendaten	21
4.2.1 Referenzfaser: NWT 1,5mm	24
4.2.1.1 SET (1,5mm Faser)	24
4.2.1.2 SET (0,8mm Faser)	27
4.3 Analyse der Messdaten	34
4.3.1 Überlappfunktion SET (1,5mm Faser)	34

4.3.2	Überlappfunktion SET (0,8mm Faser)	34
4.3.3	Beurteilung des Raytraceverfahrens	34
4.3.4	Vergleich der Teleskopjustierung und der Faser	35
4.3.4.1	Vergleich der Qualität der Teleskopjustierung	35
4.3.4.2	Vergleich der Fasern	35
5	Zusammenfassung und Ausblick	36
5.1	Zusammenfassung	36
5.2	Ausblick	36
	Quellenverzeichnis	36

Abbildungsverzeichnis

1.1	Temperaturprofile für Januar (rot) und Juli (blau) in Kühlungsborn, 12°O 54°N, nach MSIS-E-90 und die jeweilige Einteilung der Atmosphäre anhand des Temperaturgradienten [1]	2
2.1	ALOMAR-Observatorium mit den beiden grünen Laserstrahlen des RMR-Lidars [2]	5
2.2	Der BGM3-Scan. Durch Schwenken des BGM3 wird die Intensität (im RMR-Nachweisweig) der zurückgestreuten Laserpulse auf einer Höhe von 10,5km mit der Strahlausrichtung verglichen. Eine geänderte BGM3-Ausrichtung ändert auch den Punkt an dem die zurückgestreuten Laserpulse auf die CCD-Kamera treffen. Daraus ergibt sich das im Bild zu sehende Farbdigramm. Mithilfe eines Fadenkreuzes lässt sich der Punkt der maximalen Intensität (auf der CCD-Kamera) auswählen, sodass der Strahl auf diesen Punkt stablisiert wird.	8
2.3	Der Transferzweig des ALOMAR-RMR-Lidars in der Telekophalle. In Wirklichkeit gibt es zwei Öffnungen in der Telekophalle, wo die jeweiligen Strahlen der beiden Laser auf den BGM1 gestrahlt werden. Der Strahl wird über den BGM1 zum BGM2 gelenkt, welcher wieder den Strahl zum BGM3 lenkt. Dieser lenkt den Strahl koaxial zur Teleskopblickrichtung in die Atmosphäre. Die Pfeile mit der Nummer 1 zeigen auf die Fokalboxen, an denen der Umbau vorgenommen wurde. Der Pfeil Nummer 2 zeigt auf eine Abdeckung welche auch im Zuge des Umbaus hinzugefügt wurde. Diese Abdeckung ermöglicht nun aus dem Kontrollraum ferngesteuert den Strahl zu unterbrechen, was die Gefahr senkt sich durch den Strahl zu verletzen. (bearbeitet [2])	9

4.1	Die Abbildungen beschreiben:	
	a) NWT Intensitätsprofile (1,5mm Faser).	
	b) SET Intensitätsprofile (0,8mm Faser).	
	-grüner Graph Wellenlänge 355mm	
	-blauer Graph Wellenlänge 532mm.	
	c) Intensitätsverhältnis $\frac{SET}{NWT}$ (VH532)	
	d) Intensitätsverhältnis $\frac{SET}{NWT}$ (UH352)	
	am 2013-05-21 16:41:54-17:22:43	18
4.2	In der Abbildung werden 4 Plots dargestellt:	
	a) 5 verschiedene Temperatur Profile:	
	blau: SET (1,5mm Faser)	
	grün: SET (0,8mm Faser)	
	rot: NWT (1,5mm Faser)	
	türkis: MSISE90	
	lila: ECMWT	
	b) Temperaturdifferenz SET(1,5mm Faser) - SET(0,8mm Faser)	
	c) Temperaturdifferenz MSISE90 - SET(0,8mm Faser)	
	d) Temperaturdifferenz NWT(1,5mm Faser)-SET(0,8mm Faser)	
	21.05.2013 8:00-11:00	19
4.3	Die Abbildungen beschreiben:	
	a) NWT Intensitätsprofile (1,5mm Faser).	
	b) SET Intensitätsprofile (1,5mm Faser).	
	-grüner Graph Wellenlänge 355mm	
	-blauer Graph Wellenlänge 532mm.	
	c) Intensitätsverhältnis $\frac{SET}{NWT}$ (VH532)	
	d) Intensitätsverhältnis $\frac{SET}{NWT}$ (UH352)	
	15:16:03 21.05.13	24
4.4	Überlappfunktion des SET bei der Annahme, dass die Überlappfunktion des NWT gleich 1 ist (SETfaser=1,5mm ,NWTfaser=1,5mm) ($div = 125\mu rad$) (blau=-1mm, Schwarz=0mm, gelb=1mm, lila=2mm, türkis=4mm, rot=5mm, grün=6mm) 15:16:03 21.05.13	25
4.5	In der Abbildung werden 2 Plots dargestellt:	
	a) 3 verschiedene Temperatur Profile:	
	blau: NWT (1,5mm Faser)	
	grün: SET (1,5mm Faser)	
	rot: MSISE90	
	b) Temperaturdifferenz NWT(1,5mm Faser) - SET(1,5mm Faser)	
	15:16:03 21.05.13	26

4.6	Es werden zwei relative Intensitätsdifferenzen zwischen SET und NWT bei gleicher Faserkonstellation dargestellt. Die zur Berechnung der Intensitätsverhältnisses verwendeten Messungen des SETs laufen mit der 0,8mm Faser und die Messungen des NWTs laufen mit der 1,5mm Faser. Dabei wurden die gleichzeitig aufgenommenen relativen Intensitätsprofile durch ein anderer dividiert ($\frac{SET}{NWT}$) und auf die Höhe von 40km normiert. Es handelt sich um Messungen, welche in Tabelle 4.2 unter anderen Messungen erwähnt wurden. (grüner Graph am 21.05.13 um 17:02:18 und blauer Graph am 23.05.13 um 14:39:30 aufgenommen.)	27
4.7	Die Abbildungen beschreiben: a) NWT Intensitätsprofile (1,5mm Faser). b) SET Intensitätsprofile (0,8mm Faser). -grüner Graph Wellenlänge 355mm -blauer Graph Wellenlänge 532mm. c) Intensitätsverhältnis $\frac{SET}{NWT}$ (VH532) d) Intensitätsverhältnis $\frac{SET}{NWT}$ (UH352) 17:02:18 21.05.13	28
4.8	Überlappfunktion des SET bei der Annahme, dass die Überlappfunktion des NWT gleich 1 ist (SETfaser=0,8mm ,NWTfaser=1,5mm) ($div = 60\mu rad$) (blau=-1mm, Schwarz=0mm, gelb=1mm, lila=2mm, türkis=4mm, rot=5mm, grün=6mm) 17:02:18 21.05.13	29
4.9	In der Abbildung werden 2 Plots dargestellt: a) 3 verschiedene Temperatur Profile: blau: NWT (1,5mm Faser) grün: SET (0,8mm Faser) rot: MSISE90 b) Temperaturdifferenz NWT(1,5mm Faser) - SET(0,8mm Faser) 17:02:18 21.05.13	30
4.10	Die Abbildungen beschreiben: a) NWT Intensitätsprofile (1,5mm Faser). b) SET Intensitätsprofile (0,8mm Faser). -grüner Graph Wellenlänge 355mm -blauer Graph Wellenlänge 532mm. c) Intensitätsverhältnis $\frac{SET}{NWT}$ (VH532) d) Intensitätsverhältnis $\frac{SET}{NWT}$ (UH352) 14:39:30 23.05.13	31
4.11	Überlappfunktion des SET bei der Annahme, dass die Überlappfunktion des NWT gleich 1 ist (SETfaser=0,8mm ,NWTfaser=1,5mm) ($div = 20\mu rad$) (blau=-1mm, Schwarz=0mm, gelb=1mm, lila=2mm, türkis=4mm, rot=5mm, grün=6mm) 14:39:30 23.05.13	32

4.12 In der Abbildung werden 2 Plots dargestellt:	
a) 3 verschiedene Temperatur Profile:	
blau: NWT (1,5mm Faser)	
grün: SET (0,8mm Faser)	
rot: MSISE90	
b) Temperaturdifferenz NWT(1,5mm Faser) - SET(0,8mm Faser)	
14:39:30 23.05.13	33

Tabellenverzeichnis

3.1	Die Entfernung der Faser zum Brennpunkt des Teleskops, durch Fokussierung[3]	15
4.1	Faserwechsel	21
4.2	Untergrund ,Signal ,Untergrund-Signal-Verhältniss, 21.05.13	22
4.3	Untergrund ,Signal ,Untergrund-Signal-Verhältnis 23.05.13	23

Kapitel 1

Einleitung

Eine Erwärmung des Klimasystems ist eindeutig, wie nun aus Beobachtungen der Anstiege der mittleren globalen Luft- und Meerestemperaturen, dem ausgedehnten Abschmelzen von Schnee und Eis sowie dem Anstieg des mittleren globalen Meeresspiegels ersichtlich ist

[IPCC-Bericht 2007]

Eine Erwärmung des Klimasystems ist nicht zuletzt durch den anthropogenen Treibhauseffekt eindeutig und die Auswirkung auf den Menschen weitreichend. Daher kann Atmosphärenforschung als entscheidende Grundlage der Auseinandersetzung mit dem Klimawandel gesehen werden. Die Untersuchung rückt die Bedeutung der mittleren Atmosphäre¹ aus zwei mit einander verwobenen Gründen in den Vordergrund: In der mittleren Atmosphäre spielen sich zum einen klimarelevante Phänomene besonders deutlich ab, zum anderen ist diese auch an sich bisher unzureichend erforscht und so kann eine Auseinandersetzung mit der mittleren Atmosphäre an sich schon als gewinnbringend betrachtet werden.

1.1 Übersicht

Eine zentrale Rolle innerhalb der Untersuchung kommt dem ALOMAR-RMR-Lidar² zu: Dieses ist ein Fernerkundungsinstrument der mittleren Atmosphäre welches eine sehr hohe vertikale als auch zeitliche Auflösung ermöglicht und soweit die Wetterbedingungen es zulassen, eine durchgehende Inbetriebnahme erlaubt. Dadurch ist das Lidar als Messmethode äußerst effizient. Es sendet Laserpulse in die Atmosphäre. Aus den daraus gewonnenen Datenmengen können über die Lidargleichung die wichtigen physikalischen Größen wie Dichte, Druck und Temperatur abgeleitet werden. Besondere Bedeutung

¹Die mittlere Atmosphäre wird in dieser Arbeit als Strato-, Mesosphäre definiert

²**LIDAR: Light Detection and Ranging**

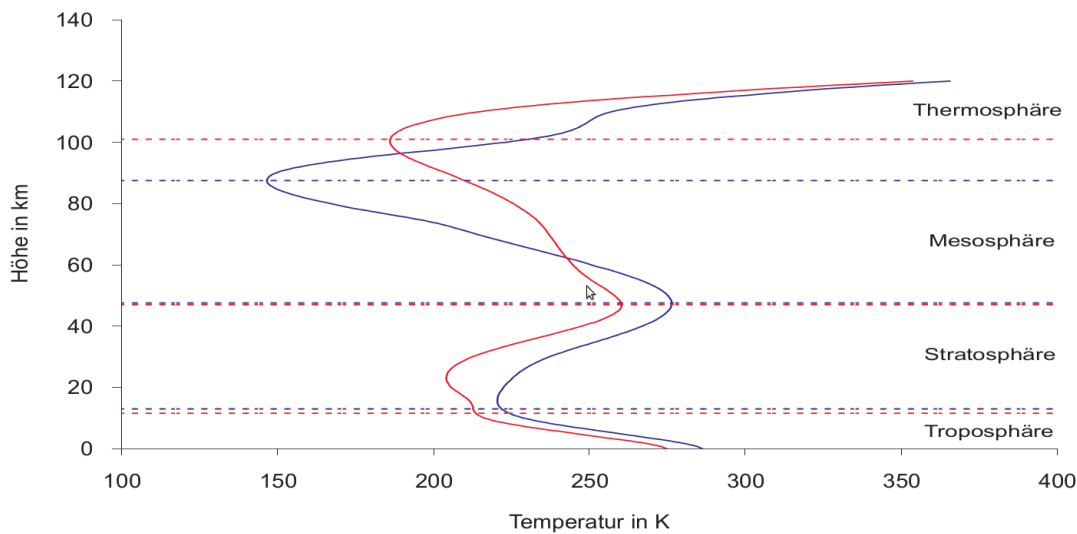


Abbildung 1.1: Temperaturprofile für Januar (rot) und Juli (blau) in Kühlungsborn, 12 °O 54°N, nach MSIS-E-90 und die jeweilige Einteilung der Atmosphäre anhand des Temperaturgradienten [1]

kann der Temperatur und dessen Gradient zur Einordnung der Atmosphäre in mehrere Schichten (Tropo-, Strato-, Meso- und Thermosphäre) zugesprochen werden. Siehe Abbildung 1.1 auf Seite 2. Die mittlere Atmosphäre ist weniger erforscht als die untere Atmosphäre. Wie schon weiter oben erwähnt spielen sich in dieser viele wichtige Phänomene, wie die "leuchtenden Nacht Wolken"(NLC³) oder polare Stratosphärenwolken (PSC⁴), ab und entfalten unter anderem eine erhebliche wechselwirkende Rückkopplung auf die untere Atmosphäre.

Die wichtigen physikalischen Größen als auch deren chemische Zusammensetzungen lassen sich anhand von zahlreichen verschiedenen Messmethoden untersuchen. Diese Arbeit wird sich jedoch auf das Lidar als Untersuchungsinstrument beschränken. Dieses kann einen Höhenintervall von 10km bis 100km untersuchen und eignet sich daher optimal für Untersuchungen der mittleren Atmosphäre.

Für das Verständnis der Arbeit ist eine Betrachtung der Funktionsweise des Lidars von besonderer Wichtigkeit: Die Strahlenbündel, welche das Lidar verlassen, divergieren. Dadurch entsteht die so genannte Streuscheibe, welche sich abhängig von der Streuhöhe in der Atmosphäre vergrößert. Das Gesichtsfeld des Teleskops muss so gewählt werden, dass die Streuscheibe innerhalb des Akzeptanzradiuses des Teleskopblickfelds liegt. Der höhenabhängige Überlapp, welcher aus dem Verhältnis von Teleskopblickfeld und Durchmesser der Streuscheibe hervorgeht, beeinflusst die Transmission des Lidars. Diesen Sachverhalt beschreibt die in dieser Arbeit thematisierte Teleskop-

³NLC: noctilucent clouds

⁴PSC: polar stratospheric clouds

Überlappfunktion(siehe 3.3.1 auf Seite 13). Hier soll auf ein technisches Problem und dessen physikalischen Ursprung hingewiesen werden, welches die Überlappfunktion maßgeblich beeinflusst:

Die zur Berechnung des Laufzeitunterschied zwischen höchster und niedrigster Streuhöhe erforderliche Gleichung ist $\Delta t = t_1 - t_2 = \frac{s_1 - s_2}{c}$. Δt ist der Laufzeitunterschied und $s_1 = 2 \cdot 100\text{km}$ und $s_2 = 2 \cdot 10\text{km}$ sind die Laufstrecken. Die Streuhöhen werden mit 2 multipliziert um den doppelten zurückgelegten Weg der Strahlenbündel Rechnung zu tragen. Dabei beträgt der Laufzeitunterschied der Laserstrahlen zwischen den Streuhöhen von 10km und 100km nur $\Delta t = 600\mu\text{sec}$. Daher lässt sich das zum Lidar gehörende Teleskop (siehe 3.3.1, Seite 13) durch mechanische Bewegung der Faser nicht nach fokussieren. Aus dieser Defokussierung ergibt sich eine Unschärfe der Abbildung des Teleskops, die wiederum den Einfluss der Überlappfunktion auf die Qualität der Messergebnisse vergrößert. Ein kleines Teleskopblickfeld, welches durch eine kleine Faser realisiert wird, ermöglicht einen kleinen Untergrund. Dieser garantiert eine gute Messqualität. Dabei soll die Überlappfunktion über ihren Höhenparameter möglichst konstant bleiben, um ihren Einfluss auf die Ergebnisse zu reduzieren. Die Auswirkung dieser Überlappfunktion auf die Qualität jener Messergebnisse ist Gegenstand der Arbeit.

Ein theoretisches Verfahren zur Evaluierung der Messergebnisse kann durch ein Raytracingverfahren vorgenommen werden. Das Raytracingverfahren ermöglicht es die Divergenz des Sendesystems und die Defokussierung des Teleskops abzuschätzen. Die Ergebnisse aus dem Raytracingverfahren und die Messergebnisse an sich ermöglichen des weiteren einen Vergleich der Justierungen der dem Lidar immanenten Zwei Teleskope (Daher spricht man auch von einem "Doppellidarsystem") und einen Vergleich der verwendeten Empfangsfasern.

1.2 Gliederung der Arbeit

In Kapitel 2 wird der Aufbau und die Funktionsweise des Lidar beschrieben. Dabei wird ein besonderes Augenmerk auf den sogenannten Transferzweig, welcher die Entstehung der Überlappfunktion hervorruft, gelegt.

In Kapitel 3 werden die theoretischen Grundlagen behandelt. Es werden die Gesetzmäßigkeiten der Atmosphäre, als auch die Physik des Lidars beschrieben.

Im Anschluss wird in Kapitel 4 das Vorgehen bei der Datenaufnahme beschrieben. Die gesammelten Daten selbst werden aufgeführt und analysiert.

Im abschließendem Kapitel 5 werden die Ergebnisse zusammengefasst.

Kapitel 2

Aufbau des Experiments

2.1 ALOMAR-RMR-Lidar

Das ALOMAR¹ Observatorium ist auf der Insel (Andøya) in Nordnorwegen stationiert. Neben dem Lidar fasst das auf einem Berg gelegene Observatorium noch weitere Radar- und passive Fernerkundungsinstrumente. Das ALOMAR-Observatorium befindet sich nahe der "Andøya Rocket Range" von wo aus Raketen zur Erkundung der Atmosphäre gestartet werden. Die Vielzahl an Messinstrumenten und das sich daraus ergebende Zusammenspiel dieser eröffnet außergewöhnliche Untersuchungsmöglichkeiten und daraus resultierend ein breiteres Informationsspektrum der Atmosphäre. Wie schon weiter oben erwähnt, konzentriert sich diese Arbeit ausschließlich auf eines der Messinstrumente, das RMR²-Lidar. Das ALOMAR-RMR-Lidar sendet kurze Lichtpulse mit einer Dauer von ca. 10ns [3] und einer Länge von 3m in die Atmosphäre aus. Der Name "RMR-Lidar" geht auf die Rayleigh/Mie/Raman-Streuung zurück. Dabei handelt es sich um drei verschiedene Streumechanismen, welche beim Lidar zur Untersuchung der Atmosphäre zusammenfinden. Die Bezeichnung ist nicht präzise, da diese aus einer Zeit stammt in der nicht alle relevanten Streumechnismen eindeutige Bezeichnungen zugeordnet werden konnten. Diese Streumechanismen werden in Abschnitt 3.2 auf Seite 11 behandelt.

Das ALOMAR-RMR-Lidar wird zur Untersuchung der PSC-, NLC-Teilchen, der Temperatur der mittleren Atmosphäre und der Dynamik oberhalb von ca. 15 Kilometern verwendet. Das Lidar ist, wie schon zuvor angeschnitten, ein Doppellidar und besteht aus einer optischen Bank, zwei Leistungslasern und zwei Teleskopen, dem SET³ und dem NWT⁴. Letztere können separat um bis zu 30° geneigt werden. Dabei kann das SET den Süd-Ost- und der NWT den Nord-West-Quadranten untersuchen. Das birgt den Vorteil, dass mithilfe des Dopplereffekts beim an den Luftmolekülen stattfindenden Streuvorgang der horizontale Wind untersucht werden kann. Um die Bewegungsrichtung

¹**ALOMAR:** Arctic Lidar Observatory for Middle Atmosphere Research

²**RMR:** Rayleigh/Mie/Raman

³**SET:** South East Telescope

⁴**NWT:** Nord West Telescope



Abbildung 2.1: ALOMAR-Observatorium mit den beiden grünen Laserstrahlen des RMR-Lidars [2]

tung als auch Geschwindigkeit der Luftmoleküle zu bestimmen, müssen Messungen in mindestens zwei Blickrichtungen durchgeführt werden. Das war ein maßgeblicher Grund das ALOMAR-RMR-Lidar als Doppellidar zu konzipieren. Durch die Neigung der beiden Teleskope kann außerdem das Atmosphärenvolumen der Trajektorie einer von der Rocket Range gestarteten Rakete zusätzlich mit Messungen vom RMR-LIDAR unterstützt werden.

2.2 Instrumentelle Komponenten

Das Lidar lässt sich in, als Zweige gekennzeichnete, unterschiedliche Aufgabenbereiche gliedern: Sende-, Transfer- und Nachweiszweig. Es wird vor allem der Transferzweig ausführlich beschrieben, da dessen Umbau ⁵ erst eine Untersuchung des Einflusses der Überlappfunktion auf die Datenqualität ermöglicht. Der Sendezweig besteht aus zwei gepulsten Nd:YAG-Lasern⁶, welche die Wellenlänge 1064nm emittieren. Gleichzeitig werden die zweite (532nm) und dritte (355nm) Harmonische von der Wellenlänge 1064nm emittiert. Zur Untersuchung der atmosphärischen Dynamik wurde die sichtbare Wellenlänge von $\lambda = 532nm$ gewählt. Die zwei dem Sendezweig inhärenten Leistungslaser

⁵eine detaillierte Beschreibung des Umbaus folgt in Abschnitt 2.2.1 auf Seite 6.

⁶**Nd:YAG-Laser:** Neodym ddotierter Yttrium-Aluminium-Granat Laser

können gleichzeitig und mit einer Pulsrate von 30,3 Hz betrieben werden, wobei ihre einzelnen Schüsse abwechselnd getriggert werden. Durch die Brownsche Bewegung der Luftmoleküle entsteht eine Dopplerverschiebung. Die Dopplerverschiebung, verursacht durch eine 1 m/s schnelle Bewegung der Streuzentren, beträgt bei der gewählten, sichtbaren Wellenlänge: $\Delta\lambda \approx 4 fm$. Dabei darf die Stabilität des Sendezweigs den Wert $\Delta\lambda/\lambda = 10^{-8}$ nicht übersteigen [3]. Diese Aufgabe übernimmt ein Seederlaser. Der vom Leistungslaser emittierte Strahl wird über zwei piezogesteuerte Spiegel umgelenkt und anschließend auf einen Durchmesser von 20cm aufgeweitet. Insgesamt liegt die Divergenz des Laserstrahls nach der Aufweitung unter $70\mu rad$, bei einer Strahlstabilität von unter $1\mu rad$ [4], wobei es eines der Ziele der Arbeit ist die Systemdivergenz durch Vergleich mit den theoretischen Werten, welche durch ein Raytraceverfahren gewonnen wurden, abzuschätzen. Anschließend wird der Strahl durch den Transferzweig in die Atmosphäre gelenkt. Die an der Atmosphäre gestreuten Strahlen werden durch das Teleskop auf eine RMR-Empfangsfaser abgebildet und durch diese in den Nachweiszweig geleitet. Letzterer besteht zwar nur aus einer optischen Bank, kann aber dennoch die beiden empfangenen Signale aus dem SET und dem NWT zeitversetzt verarbeiten. Durch ein Faserselektor werden beide Fasern an die optische Bank angeschlossen. Das von ihnen übermittelte Signal wird, durch einen für tiefe Streuhöhen konzipierten Chopper, abgeblockt. Dadurch wird gewährleistet, dass eine zu starke Intensität der zurückgestreuten Strahlen die Instrumente nicht beschädigt. Außerdem kann durch die ohnehin in tiefen Höhen stattfindende Mie-Streuung auf diesen Höhen kein aussagekräftiges Signal bestimmt werden. (siehe 3.2.2 auf Seite 12). Das von dem Transferzweig in den Nachweiszweig geleitete Signal wird auf die relevanten Frequenzen aufgeteilt. Tagsüber wird es durch ein Etalon geleitet, um den von der Sonne verursachten Untergrund abzuschwächen. Danach wird es in ein elektrisches Signal umgewandelt. Da es in den Breitengraden, in denen die Messungen stattfinden, im Sommer durchgehend hell ist, erlaubt die Verwendung eines Etalons auch im Sommer, und damit ganzjährige, Messungen. Ein Computer speichert das Signal als höhenabhängige Zählrate. Aus der Zählrate lassen sich die relevanten physikalischen Größen berechnen.

2.2.1 Besonderheiten des Transferzweig

Dem Transferzweig kommt eine besondere Bedeutung zum Verständniss der durch Abbildungsfehler entstehenden Überlappfunktion zu und erfordert eine gesonderte Betrachtung. Diese soll im Folgendem gegeben werden.

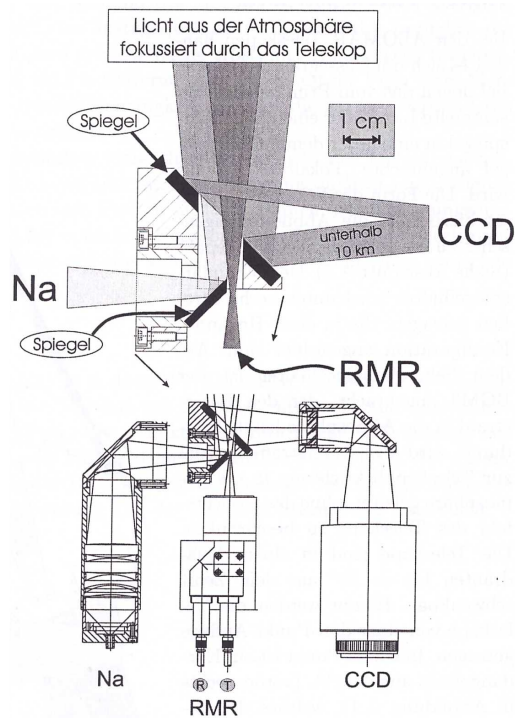
Der in den Transferzweig geleitete Laserstrahl wird in die Atmosphäre gelenkt und bündelt die zurück gestreuten Photonen auf die RMR-Empfangsfaser. Die BGMs⁷ leiten, wie in Bild 2.3 anschaulich gemacht, den Strahl coaxial zur Teleskopblickrichtung in die Atmosphäre. Der erste BGM muss während des Betriebs nicht nachgestellt werden. Schwenkt das Teleskop aus dem Zenit, ändert sich die Position des BGM2. Das BGM2 und BGM3 müssen der veränderten Position entsprechend nachgestellt werden. Dieser Vorgang läuft automatisch ab. Außerdem muss das BGM3 bei dem BGM3-Scan (siehe

⁷BGM: Beam Guiding Mirror

Abbildung 2.2 in der ein solcher durchgeführt wird) und bei der daraus resultierenden Strahlstabilisierung nachgestellt werden.⁸

Die beiden Teleskope bestehen jeweils aus sphärischen Primärspiegel. Diese weisen einen Durchmesser von 1,8m und eine Brennweite von 8,3m auf. Der Sekundärspiegel (Bild 2.3 auf der Rückseite des BGM3) befindet sich 2,07m über dem Primärspiegel und verdeckt somit den mittleren Bereich des Gesichtsfeldes des Teleskops. Wie in Abbildung 2.3 schematisch dargestellt, werden die Strahlen vom Primärspiegel über den Sekundärspiegel in die Empfangsfaser geleitet. Diese Glasfaser befindet sich, beweglich entlang der optischen Achse verstellbar, in der Fokalbox.

Dort werden die Strahlen in drei verschiedene Empfangszweige aufgespalten. Ein



mit einem Loch versehener und um 45° gedrehter Planspiegel koppelt das Licht aus der unteren Atmosphäre aus und lenkt es zu einer CCD-Kamera. Diese wird zur Strahlstabilisierung verwendet. Dazu wird zunächst ein BGM3-Scan durchgeführt, welcher die CCD-Kamera kalibriert. Auf einer Höhe von 10,5km wird durch Schwenken des BGM3 die Intensität des Signals im RMR-Nachweisweig in Abhängigkeit zur Strahlausrichtung gemessen. Der zur maximalen Intensität gehörige Punkt kann auf der CCD-Kamera festgestellt werden und zur Strahlstabilisierung auf diesen Punkt ausgenutzt werden (siehe 2.2 auf Seite 8). Ein weiterer Teil des Lichtes wird in den NA-Empfangszweig geleitet. Der restliche mittlere Teil strahlt in die Glasfaser des RMR-Nachweisweiges (siehe Bild links)

schematische Darstellung des Strahlengangs
in der Fokalbox aufgeteilt in:
den RMR-Empfangszweig
NA-Empfangszweig
CCD-Kamera-Empfangszweig [3]

⁸wird weiter unten ausführlicher erklärt

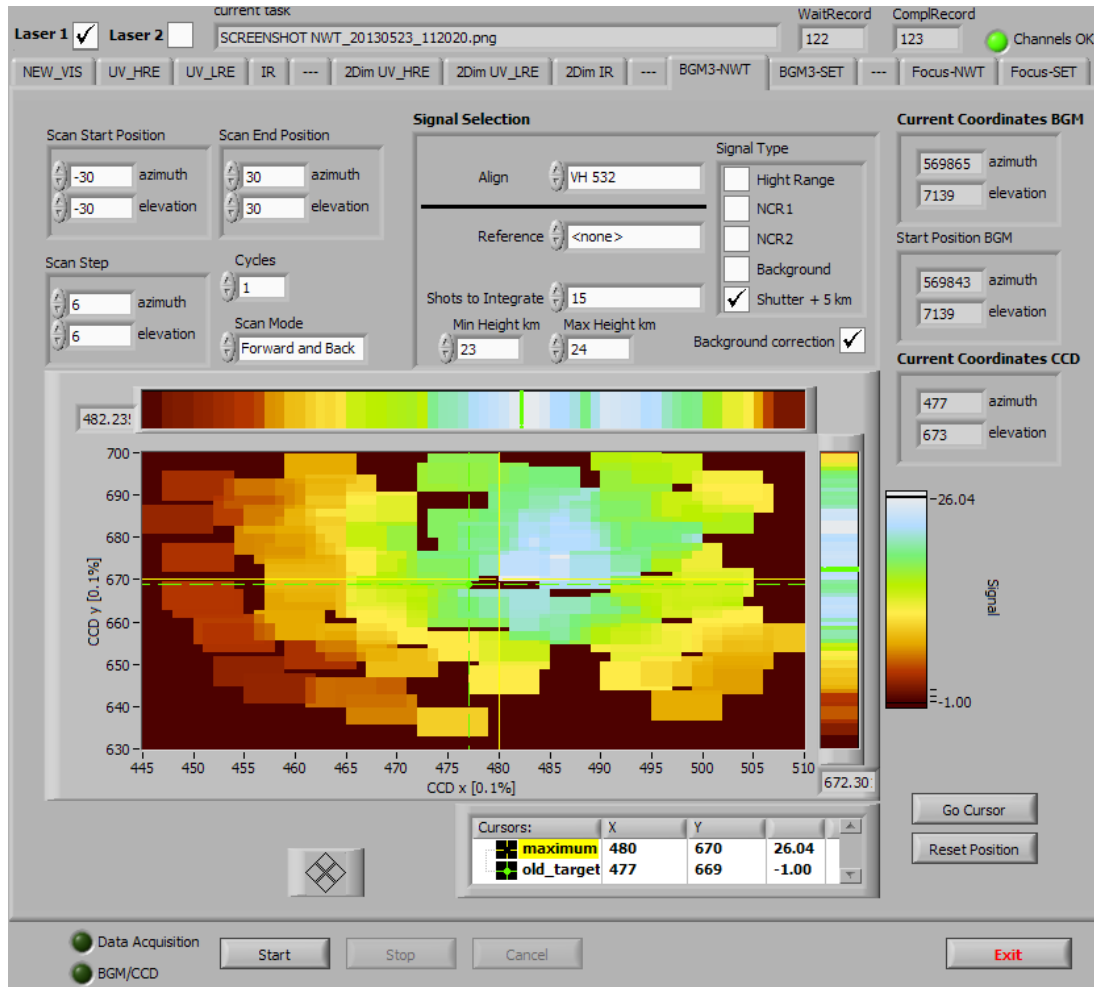


Abbildung 2.2: Der BGM3-Scan. Durch Schwenken des BGM3 wird die Intensität (im RM-R-Nachweiszweig) der zurückgestreuten Laserpulse auf einer Höhe von 10,5km mit der Strahlausrichtung verglichen. Eine geänderte BGM3-Ausrichtung ändert auch den Punkt an dem die zurückgestreuten Laserpulse auf die CCD-Kamera treffen. Daraus ergibt sich das im Bild zusehende Farbdiagramm. Mithilfe eines Fadenkreuzes lässt sich der Punkt der maximalen Intensität (auf der CCD-Kamera) auswählen, sodass der Strahl auf diesen Punkt stabilisiert wird.

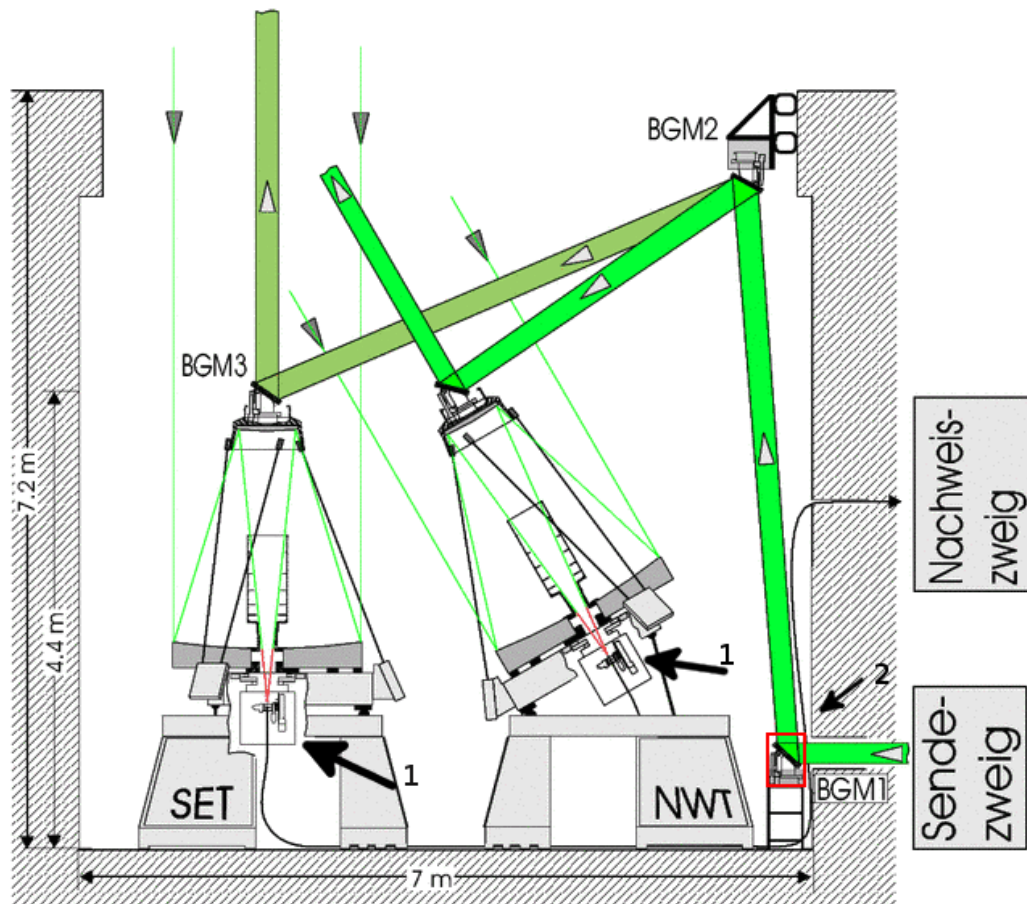


Abbildung 2.3: Der Transferzweig des ALOMAR-RMR-Lidars in der Telekophalle. In Wirklichkeit gibt es zwei Öffnungen in der Telekophalle, wo die jeweiligen Strahlen der beiden Laser auf den BGM1 gestrahlt werden. Der Strahl wird über den BGM1 zum BGM2 gelenkt, welcher wieder den Strahl zum BGM3 lenkt. Dieser lenkt den Strahl coaxial zur Teleskopblickrichtung in die Atmosphäre. Die Pfeile mit der Nummer 1 zeigen auf die Fokalboxen, an denen der Umbau vorgenommen wurde. Der Pfeil Nummer 2 zeigt auf eine Abdeckung welche auch im Zuge des Umbaus hinzugefügt wurde. Diese Abdeckung ermöglicht nun aus dem Kontrollraum ferngesteuert den Strahl zu unterbrechen, was die Gefahr senkt sich durch den Strahl zu verletzen. (bearbeitet [2])

Kapitel 3

Theoretische Grundlagen

Wie schon in der Einleitung erwähnt, werden hier die theoretischen Grundlagen zum Lidar geliefert. Einerseits werden die für das Verständnis des Lidar notwendigen theoretischen Grundlagen behandelt, andererseits die physikalischen Grundlagen der Atmosphäre beschrieben.

Dieses dritte Kapitel ist in drei Unterabschnitte unterteilt. Der erste Abschnitt behandelt die hydrostatische Integration. Der zweite Abschnitt setzt sich mit den für das Lidar relevanten Streumechanismen auseinander. Im dritten Abschnitt wird letztendlich die Lidargleichung aufgestellt. Die Intensität des zurückgestreuten Signals hängt von den der Gleichung inhärenten Parameter ab und ermöglicht eine ex situ Analyse des Zustands der Atmosphäre.

3.1 hydrostatische Integration

Über die hydrostatische Integration lässt sich aus dem Dichteprofil die Temperatur berechnen. Das Intensitätsprofil der zurückgestreuten Strahlen ist direkt proportional zum Dichteprofil. Das Lidar bildet die Atmosphäre räumliche sowie zeitliche nicht ausreichend scharf ab. Es wird deshalb angenommen, dass sich die Atmosphäre in einem hydrostatischen Gleichgewicht befindet. Erst auf meterweite Entfernungen trifft diese Annahme aufgrund von Turbulenzen nicht mehr zu. Die hydrostatische Grundgleichung lautet:

$$\frac{dp}{dz} = -\rho g(z)$$

oder als Integral dargestellt:

$$p_0 - p(z) = \int_{z_0}^z \rho(z)g(z)dz \quad (3.1)$$

Die in der oberen Gleichung enthaltene Erdbeschleunigung $g(z)$ lässt sich durch folgende Gleichung berechnen:

$$g(z) = \frac{m_{Erde} \cdot G}{z_{Erde}^2 + z^2} \quad (3.2)$$

z ist die Höhe und z_0 ist der höchste Punkt über den integriert wird. Der dazugehörige Druck ist p_0 . $g(z)$ ist die höhenabhängige Erdbeschleunigung. z_{Erde} ist der durchschnittliche Erdradius. m_{Erde} ist die Erdmasse und G die Gravitationskonstante. $\rho(z)$ beschreibt die Dichte an der Stelle z . Dabei wird angenommen, dass sich das Mischverhältnis der einzelnen Luftkomponenten über den Höhenparameter nicht ändert. Damit kann die Dichte ρ durch die als konstant angenommene mittlere Molekülmasse $m_{molecule}$ und höhenabhängige Teilchenzahl $n(z)$ ausgedrückt werden. Die mittlere Molekülmasse kann erst in der oberen Atmosphäre durch Entmischung der Luft als höhenabhängig angenommen werden.

$$\rho(z) = m_{molecule} \cdot n(z) \quad (3.3)$$

Luft qualifiziert sich bei den herrschenden Bedingungen in unserem Modell als ideales Gas.

$$p(z) = n(z) \cdot k_B \cdot T(z) \quad (3.4)$$

k_B beschreibt dabei die Boltzmann-konstante und $T(z)$ das Temperaturprofil. Aus den Gleichungen 3.1, 3.3 und 3.4 geht die Gleichung für das Temperaturprofil hervor:

$$T(z) = \frac{1}{n(z)} \left(T_0 \cdot n_0 - \frac{m}{k_B} \int_{z_0}^z n(z) g(z) dz \right) \quad (3.5)$$

Die Starttemperatur T_0 beschreibt die Temperatur auf der Höhe z_0 und wird über eine Referenzatmosphäre bestimmt.

3.2 Streumechanismen

Um die in die Atmosphäre ausgesendeten Strahlen analysieren zu können, müssen diese an den Konstituenten der Atmosphäre gestreut werden. Dafür sind verschiedene Streumechanismen verantwortlich. Sie bilden in der Lidargleichung (siehe 3.3 auf Seite 12) den, für die Temperaturberechnung entscheidenden, Term für den Volumenrückstreuungskoeffizienten. Bei der Streuung werden die Photonen absorbiert, wobei entweder ein reeller oder virtueller Zustand höherer Energie entsteht. Im Anschluss findet eine Relaxation des angeregten Elektrons statt und bewirkt die Abgabe eines Photons. Dabei kann sich der erfolgte, neue Zustand des Elektrons von dessen Anfangszustand unterscheiden und somit die Energie und Richtung des Photons ändern.

3.2.1 Cabannes-/Rotations-Raman-/Streuung

Die in der Bezeichnung "RMR-Lidar" enthaltene Rayleigh-Streuung, setzt sich aus einer Kombination der Rotations-Raman und Cabannes-Streuung zusammen. Dabei ist die Cabannes-Streuung die elastische Streuung. Das bedeutet, dass die Energie der absorbierten Photonen identisch der Energie der emittierten Photonen ist. Das aufgenommene Photon regt ein Elektron auf ein virtuelles Niveau an. Dieses Elektron fällt dann wieder,

bei gleichzeitiger Emission eines neu entstandenen Photons, auf seinen Grundzustand zurück.

Die Rotations-Raman-Streuung ist inelastisch. Während dieser Streuung fällt demnach das angeregte Elektron nicht wieder zurück in seinen Anfangszustand. Somit hat das emittierte Photon einen, um den Energiebetrag der Differenz zwischen den Zuständen, kleineren Energiebetrag. Der Zustand ändert sich in der Rotationsquantenzahl.

Der Anteil der Cabannes-Streuung am Streuvorgang ist wesentlich größer als der der Rotations-Raman-Streuung. Die Vibrations-Raman-Streuung ist eine weitere Streuung.¹ Sie ist um ca. zwei Größenordnungen kleiner als die beiden anderen Streumechanismen. Sie kann jedoch unterstützend zu Temperaturberechnungen in Aerosol enthaltende Höhenbereichen verwendet werden, da in diesen Höhenbereichen die Temperatur sonst durch Mie-Streuungen verfälscht wird.

3.2.2 Mie-Streuung

Die Mie-Streuung beschreibt die elastische Streuung von Photonen an Teilchen. Dabei entspricht die Größenordnung der Teilchengröße der der Wellenlänge des Lichtes. Teilchen ab einer solchen Größe sind Aerosole. Die Streuung an diesen, also die Mie-Streuung, verhindert die Berechnung von Temperaturen unterhalb von 10 Kilometer. Bis auf NLCs spielen Aerosole bei zunehmender Höhe eine immer weiter abnehmende Rolle und verlieren ihre Bedeutung gänzlich ab einer Höhe von 40km. In diesem Bereich werden diese in der Auswertung der Messungen berücksichtigt.

3.3 Lidargleichung

Die Lidargleichung beschreibt die Einflussfaktoren auf die zurückgestreute Intensität. Letztere ergibt sich aus atmosphärischen und gerätespezifischen Parametern. Aus der Lidargleichung lässt sich die Temperatur berechnen:

$$I(\lambda, z_i) = I_0(\lambda, z_i) \beta(\lambda, z_i) dz \cdot \eta(\lambda) T^2(\lambda, z_i) \frac{A}{4\pi z_i^2} o(z_i) + U_z \quad (3.6)$$

I_0 emittierte Laserintensität

$\beta(\lambda, z_i)$ Volumenrückstreuoeffizient. Dieser besteht aus den die Rückstreichmechanismen beschreibenden Variablen. Diese Variablen selbst sind nach der ihnen zukommenden Relevanz an der Streuung gewichtet. (siehe 3.2 auf Seite 11)

$$\beta(\lambda, z_i) = \beta_{Raman}(\lambda, z_i) + \beta_{Rayleigh}(\lambda, z_i) + \beta_{Mie}(\lambda, z_i)$$

dz Höhenintervall. Gibt an über die Größe der Höhenintervalle über die die Photonen summiert werden. Zur Bestimmung der Größe der Höhenintervalle wird über die

¹Die Vibrations-Raman-Streuung ist eine inelastische Streuung bei der sich die Vibrationsquantenzahl des Elektrons ändert.

Zeitintervalle summiert. Diese werden dann mithilfe der Lichtgeschwindigkeit in Höhenintervalle umgewandelt. i beschreibt die jeweiligen Höhenintervalle.

$\eta(\lambda)$ Gerätekonstante. Diese Größe ist wellenlängen- und messaperturabhängig. Dabei werden die Verluste eines realen Systems und die Quanteneffizienz der Detektoren berücksichtigt.

$T(\lambda, z_i)$ Transmission der Atmosphäre. Das Licht wird bei Durchqueren der Atmosphäre an ihr gestreut. Dadurch kommen die Laserpulse abgeschwächt am Teleskop an. Der Laserpuls muss den Weg durch die Atmosphäre doppelt durchlaufen und somit fließt die Transmission quadratisch in die Lidargleichung ein.

A Fläche des Teleskops. Dabei ist $\frac{A}{4\pi z_i^2}$ der Raumwinkel, welcher sich aus der Fläche des Teleskops und der Entfernung zum Streuzentrum ergibt. Aus der Definition der Raumwinkel fließt die Entfernung des Streuzentrums in den Term quadratisch ein.

$o(z_i)$ Die Überlappfunktion. Sie beschreibt den Überlapp der Sende- und Empfangskeule.

U_z Untergrund-Zählrate. Der Untergrund ist eine höhenunabhängig Fehlzählrate.

3.3.1 Die Überlappfunktion

Die Überlappfunktion (Uef). Beschreibt den Überlapp zwischen der Sende- und Empfangskeule. In dem Bild 2.3 auf Seite 9 werden die Empfangskeule durch Pfeile nach unten und die Sendekeule durch Pfeile nach oben schematisch dargestellt. Der Durchmesser der Streuscheibe D_{Sende} (im Bild der Querschnitt des grünen, nach oben laufenden Strahls) wird durch den Anfangsdurchmesser D_a und die Divergenz des Sendesystems (div) wie folgt bestimmt:

$$D_{Sende}(z) = D_a + z \cdot div$$

z Streuhöhe

d_a Anfangsdurchmesser

div Divergenz des Sendesystems

Die Divergenz des Sendesystems setzt sich aus der Divergenz des Lasers und der Qualität der Stabilisierung des Laserstrahls zusammen. Schon bei einer angenommenen Divergenz von $70\mu rad$ [4] und einem Anfangsdurchmesser von $D_a = 20cm$ [5] ergibt sich bei Höhen von 50km ein Streuscheibendurchmesser von $D = 3,7m$. Daraus lässt sich auf eine sekundäre Bedeutung des Anfangsdurchmessers schließen.

Die Empfangskeule beschreibt das vom Teleskop betrachtete Volumen. Das Teleskopgesichtsfeld (FOV²) beschreibt die Empfangskeule. Die folgende Formel dient zur Berechnung des FOV:

$$FOV = \frac{d_{Faser}}{f}$$

f Brennweite

d_{Faser} Faserdurchmesser

$D_{Empfang}(h)$ Querschnittsdurchmesser der Empfangskeule

Um den an einer bestimmten Höhe angesetzten Querschnittsdurchmesser der Empfangskeule $D_{Empfang}$ zu bestimmen, muss der Anfangsdurchmesser der Empfangskeule (entspricht in diesem Fall dem Primärspiegeldurchmesser $D_{Spiegel}$) wie folgt mitberücksichtigt werden:

$$D_{Empfang}(z) = D_{Spiegel} + z \cdot FOV$$

$D_{Spiegel}$ Primärspiegeldurchmesser

Dem Anfangsdurchmesser kommt bei der Empfangskeule eine größere Bedeutung zu als beim Sendezweig. Bei einem Primärspiegeldurchmesser von $D_a = 1,8m$ [6] auf einer Höhe von 50km und einem Faserdurchmesser von $d_{faser} = 1,5mm$ ergibt sich ein Gesamtdurchmesser von $D_{Empfang}(50Km) = 10,8m$.

Geht man davon aus, dass die Sende- und Empfangskeule coaxiall zueinander verlaufen, keine Defokussierungseffekte auftreten, darüber hinaus die Intensität über die Streuscheibe gleich verteilt ist und der sekundär Spiegel keinen Einfluss spielt, kann die Überlappfunktion (UEf) naiv wie folgt berechnet werden:

$$\begin{aligned} UEf(z) &= 1 && \text{für } D_{Sende} \leq D_{Empfangs} \\ UEf(z) &= \frac{A_{Empfangs}}{A_{Sende}} = \frac{D_{Empfangs}^2}{D_{Sende}^2} && \text{für } D_{Sende} > D_{Empfangs} \end{aligned}$$

In unserem Fall wurde zur theoretischen Berechnung der Überlappfunktion ein zutreffenderes Modell mit Hilfe des Raytraceverfahren gewonnen. Dieses Modell nähert, unter Berücksichtigung der gaußschen Intensitätsverteilung des Laserpulses, den planaren Primärspiegel durch eine Linse an. Des weiteren berücksichtigt das Raytraceverfahren den entscheidenden Defokussierungseffekt. Der Defokussierungseffekt ist auf das Fehlen einer technischen Umsetzung der Teleskopfokussierung zurückzuführen: Die analysierten Streuzentren liegen nicht weit genug vom Teleskop entfernt um von diesem als unendlich weit angenommen werden zu können. Somit müsste das Teleskop, um eine optimale Abbildung zu erhalten, nach fokussiert werden, indem die Empfangsfaser in die Bildweite des Teleskops verschoben werden müsste. Durch den geringen Laufzeitunterschied

²**FOV**: **F**ield of **V**iew

zwischen der höchsten und niedrigsten Höhe des Streuzentrums kann eine Fokussierung technisch nicht realisiert werden. Stattdessen wird die Faser entlang der optischen Achse so verschoben, dass möglichst kleine Fehlfokussierungen an beiden Extremen, dem höchsten und tiefsten Streupunkt, entstehen. (siehe Tabelle 3.1) Daher liegt die optimale Fokussierentfernung (bei einer Streuhöhe von 26,1 km) 2,67mm hinter dem Brennpunkt.

Tabelle 3.1: Die Entfernung der Faser zum Brennpunkt des Teleskops, durch Fokussierung[3]

Streuhöhe	Bildweite ab dem Fokus		
10km	4,65mm	Bei tiefster Streuhöhe	
26,1km	2,67mm	optimale Fokussierung	
100km	0,70mm	Bei höchster Streuhöhe	

Die Auswirkung der Überlappfunktion auf die Temperatur ist nicht durch die Überlappfunktion sondern durch seinen Gradienten definiert somit muss die Überlappfunktion über die Streuhöhe konstant bleiben um keine Auswirkung auf die Temperatur zu haben.

3.3.2 Der Untergrund

Bei jeder Messung wird eine möglichst hohe Datenqualität angestrebt. Diese wird beim Lidar durch einen im Vergleich zum Signal kleinen Untergrund realisiert. Der Untergrund ist eine höhenunabhängig Fehlzählrate welche entweder durch eine Dunkelzählrate, oder durch mit dem Laser nicht synchronisiertes Licht entsteht. Die Dunkelzählrate wird hervorgerufen durch zufällige Elektronenflüsse im Detektor. Diese lassen sich nicht von dem durch zurückgestreute Photonen entstehendem Signal unterscheiden. Eine erhöhte Temperatur verstärkt diesen Effekt, weshalb die Detektoren gekühlt werden müssen. Während der Nacht ist der durch fremde Quellen entstehende Untergrund schwach. Der Untergrund wird in Photonen pro Höhenintervall angegeben. Die Photonen werden während einer bestimmten Laserpulsanzahl detektiert. Beim Betrieb während der Nacht liegt der Untergrund im Bereich von wenigen Photonen pro 200m und 4000 Laserpulsen [1]. Bei Sonnenaufgang unterdrückt ein Etalon den Untergrund. Das Sonnenspektrum hat eine Eigenart wodurch ein Etalon erst funktionieren kann. Das Strahlspektrum der Sonne lässt sich durch einen Schwarzkörperstrahler (Temperatur von 5800K) beschreiben. Das Frequenzspektrum der Sonne weist jedoch als Eigenart einige Einbrüche auf, welche durch Absorption ihrer Photosphäre verursacht werden. Diese Eigenart kann zu Nutze gemacht werden, indem die Laserwellenlängen des Lidars in einem solchem Minimum gewählt werden. Das Etalon ist ein sehr schmaler Spektralfilter, welcher nur in diesem schmalen Bereich das Signal im Nachweiszweig durchlässt.

Der Untergrund lässt sich gut in Höhen von 120km bis 200km bestimmen. Ab 120km wird kaum noch ein Lasersignal zurück reflektiert und so können sämtliche empfangenen Signale als Untergrund angenommen werden. Da der Untergrund höhenunabhängig ist, kann er über das ganze Höhenprofil von dem gesamten Signal abgezogen werden. Ansonsten würde die Temperaturberechnung fehlerhaft sein. (siehe Lidargleichung in Abschnitt 3.3)

Der Untergrund vergrößert das Rauschen der statistischen Messungen und verschlechtert so die Qualität der Daten. Die Lidarmessung sind statistischer Natur, da der Streuprozess isotrop ist. Die Laserpulse werden also in beliebige Richtung an der Atmosphäre gestreut. Daraus folgt, dass die gestreuten Laserpulse nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit wieder am Teleskop ankommen. Das heißt es entsteht ein (bei statistischen Messungen immer auftretender) zufälliger Fehler. Im Fall des Lidars ist der zufällige Fehler durch eine Poisson-Verteilung (Standardabweichung des Mittelwerts gleich $\sigma = \sqrt{n}$ und der Zählrate n) gekennzeichnet. Für die Berechnung des Fehlers wurde das Sigma-1 Niveau verwendet. Das heißt, $\tau = 1$ (für lange Messreihen wie beim Lidar) und damit liegt die Vertrauensgrenze bei 68,27%. Ein weiterer Fehler entsteht bei der Bestimmung des Untergrunds, welcher auch Poisson verteilt ist. Für einen steigenden Untergrund (Rauschen) folgt ein kleineres und damit schlechteres Signal-Rausch-Verhältnis. Das Signal-Rausch-Verhältnis gilt als Maß für die Datenqualität. Eine Reduktion des Untergrunds verbessert die Datenqualität entscheidend. Um einen möglichst kleinen Untergrund zu gewährleisten, muss das Gesichtsfeld des Teleskops so gewählt werden, dass die Streuscheibe möglichst einen Großteil des Teleskopblickfelds ausfüllt, ohne es jedoch dabei zu verlassen.

Kapitel 4

Datenanalyse

In diesem Kapitel soll zunächst die Gesamtvorgehensweise behandelt werden. Diese lässt sich in das Vorgehen bei der Messdatenaufnahme und dem Vorgehen bei der Messdatenanalyse unterteilen. Daraufhin werden die Messdaten veranschaulicht. Zunächst werden die allgemeinen Informationen zu den Faserwechsel, dem Signal und dem Untergrund geben.

Im Anschluss werden die Messdaten visualisiert und analysiert, sodass eine Aussage über das Gesamtverfahren und das tatsächliche System getroffen werden kann.

4.1 Methode

4.1.1 Vorgehen bei der Messdatenaufnahme

Die für diese Arbeit konzipierten Messungen wurden im Mai 2013 durchgeführt. Mit Hilfe der Messungen soll einerseits die Überlappfunktion bestimmt werden und andererseits ein Vergleich der Justierungen der dem Lidar immanenten zwei Teleskope vorgenommen werden. Zu diesem Zweck wurden gleichzeitig Messungen mit zwei verschiedenen RMR-Empfangsfasern vorgenommen. So wurde eine kleinere und eine größere Faser (Durchmesser von 0,8mm bzw. 1,5mm) verwendet. Die Fasergrößen üben direkten Einfluss auf die Überlappfunktion aus (siehe Abschnitt 3.3.1 auf Seite 13). In der Tabelle 4.1 auf Seite 21 wird unter anderem dargestellt, wann welche Faser bei welchem Teleskop in Betrieb war. Begleitend zu den Intensitätsprofilen wird auch der Untergrund bestimmt (siehe Abschnitt 3.3.2 auf Seite 15). Das Verhältnis zwischen Untergrund und Intensität gibt Auskunft über die Datenqualität.

Es wurde darauf geachtet nur eine Faser und damit nur eine Veränderliche zur Zeit zu ändern, um auszuschließen, dass die damit verbundene Änderung der Messwerte weitere Ursachen haben könnte.

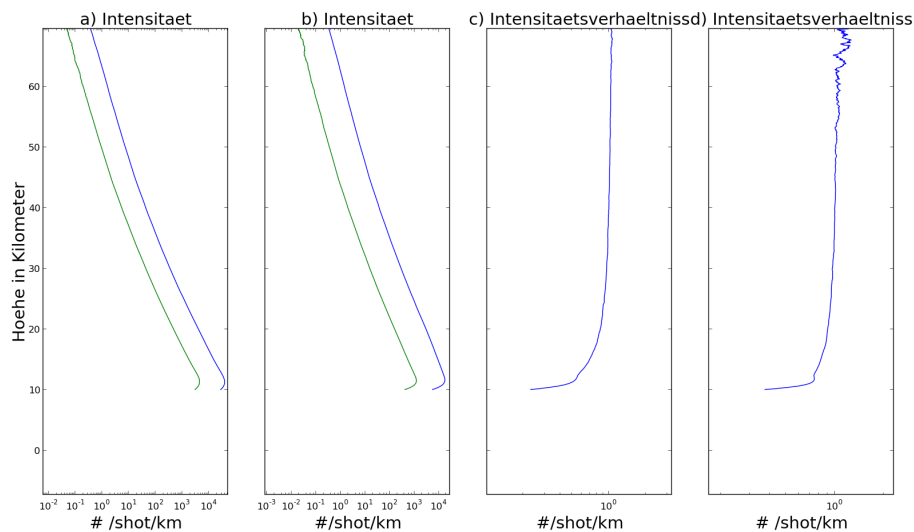


Abbildung 4.1: Die Abbildungen beschreiben:

a) NWT Intensitätsprofile (1,5mm Faser).

b) SET Intensitätsprofile (0,8mm Faser).

-grüner Graph Wellenlänge 355mm

-blauer Graph Wellenlänge 532mm.

c) Intensitätsverhältnis $\frac{SET}{NWT}$ (VH532)

d) Intensitätsverhältnis $\frac{SET}{NWT}$ (UH352)

am 2013-05-21 16:41:54-17:22:43

4.1.2 Vorgehen bei der Analyse der Messdaten

Die Messdaten, also Intensitätsprofile ¹ der jeweiligen Wellenlängen, werden vom Computer als Mittelwert über verschiedene Zeitintervalle ausgegeben. Diese wurden auf eine Höhe von 40.00km normiert und im Anschluss visualisiert ², um sie miteinander vergleichen zu können. Aus diesen relativen Intensitätsprofilen wurde durch Division der, aus den gleichzeitig betriebenen Teleskopen resultierenden, Intensitätsprofile die Intensitätsverhältnisse bestimmt ³.

Aus den Intensitätsprofilen lässt sich, die relevante physikalischen Funktion, das Temperaturprofil berechnen. Es ist also besonders von Interesse herauszufinden in wie weit die Überlappfunktion eine Auswirkung auf diese hat. Diese wurden analog zu den Intensitätsprofilen visualisiert ⁴. Außerdem wurden zwei weitere Temperaturprofile aus theoretischen Modellen zum Vergleich beigelegt. Erstens das ECMWF ⁵-Model und

¹in Form von ASCII-Tabellen

²siehe beispielhaft die ersten beiden Abbildungen 4.1 auf Seite 18

³siehe die letzten beiden Abbildung 4.1

⁴siehe beispielhaft den blauen und grünen Graph in Abbildung a) von 4.2 auf Seite 19

⁵ECMWF: European Center for Medium-Range Weather Forecast [7]

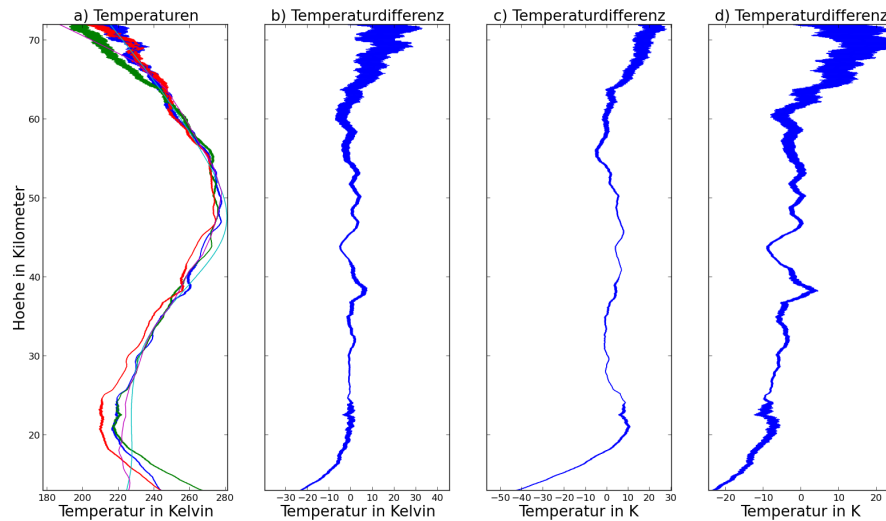


Abbildung 4.2: In der Abbildung werden 4 Plots dargestellt:

a) 5 verschiedene Temperatur Profile:

blau: SET (1,5mm Faser)

grün: SET (0,8mm Faser)

rot: NWT (1,5mm Faser)

türkis: MSISE90

lila: ECMWT

b) Temperaturdifferenz SET(1,5mm Faser) - SET(0,8mm Faser)

c) Temperaturdifferenz MSISE90 - SET(0,8mm Faser)

d) Temperaturdifferenz NWT(1,5mm Faser)-SET(0,8mm Faser)

21.05.2013 8:00-11:00

zweitens das MSISE90⁶-Modell. Das ECMWF-Modell ist ein theoretisches Modell des europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage. Das MSISE90 ist ein empirisches Modell der Temperatur und der Komponenten der Atmosphäre basierend auf Daten von Massenspektrometern von Satelliten und weiteren Daten von Radaren die auf inkohärenter Streuung basieren. Die Graphen b), c), d), in Abbildung 4.2 auf Seite 19 beschreiben beispielhafte Differenzen des SET (0,8mm Faser) mit den anderen drei Temperaturprofilen aus Bild a) der gleichen Abbildung. Dabei wird in d) die Auswirkung der Überlappfunktion auf die Temperatur gezeigt.

Die berechneten Überlappfunktionen wurden im Anschluss mit theoretischen Werten, welche durch das Raytraceverfahren gewonnen wurden, verglichen. Dabei werden verschiedene Überlappfunktionen in Abhängigkeit von verschiedenen angenommenen Divergenzen des Sendesystems und Fehlfokussierungen der Teleskope simuliert. Durch die Verwendung der minimalen quadratischen Abweichung (*Quad*) zwischen den beiden

⁶MSISE90: Mass Spectrometer - Incoherent Scatter- Model of Upper Atmosphere [8]

Überlappfunktionen lässt sich wie folgt der optimale Fitt feststellen:

$$Quad = \sum_{dz} (UEF_{raytrace} - UEF_{Messung})^2 \quad (4.1)$$

Das heißt, es wurde die theoretische Überlappfunktion bestimmt, welche am ehesten mit der gemessenen Überlappfunktion übereinstimmt. Die für die theoretische Überlappfunktion (hervorgehend aus dem Fitt) vorausgesetzte Divergenz und Fehlfokussierung kann als Abschätzung des realen Systems gesehen werden. Die Überlappfitts wurden aus zwei Gründen lediglich zwischen 20km und 60km durchgeführt.

1. das Raytracemodell nähert den planaren Primärspiegel durch ein Linse an. Besonders im Nahfeld des Teleskops führt diese Annäherung zu Fehlern. Um diese Fehler zu minimieren wurde der Fitt (minimale quadratische Abweichung) erst ab 20km durchgeführt.
2. Der Fehler der gemessenen Intensitätsprofile wird ab Höhen über ca. 60km so groß, dass der Mittelwert den realen Wert immer schlechter wiedergibt (siehe beispielsweise Abbildung 4.5 auf Seite 26). Auch die Überlappfunktion wird dadurch immer ungenauer. Um diesen Fehler zu minimieren wurde der Fitt (minimale quadratische Abweichung) lediglich bis 20km durchgeführt.

4.2 Veranschaulichungen der Messdatendaten

Mithilfe der folgenden Tabelle 4.1 soll nachvollzogen werden, wann welche Faser in welchem Teleskop eingesetzt wurde.

Datum	21.05.13	21.05.13	21.05.13	21.05.13	21.05.13	23.05.13
Anfangszeit	08:58:49	11:55:43	14:55:30	16:41:54	17:53:48	11:30:06
Endzeit	10:53:00	13:28:18	15:36:37	17:22:43	18:26:40	12:59:15
SET Faser	0,8	1,5	1,5	0,8	0,8	0,8
NWT Faser	0,8	0,8	1,5	1,5	0,8	0,8
Datum	23.05.13	23.05.13	23.05.13	23.05.13	23.05.13	
Anfangszeit	14:04:36 (NWT 14:05:10)	15:51:44	17:47:54	19:10:02	23:00:48	
Endzeit	15:14:58 (NWT 15:13:50)	17:06:38	18:59:44	22:59:05	23:14:50	
SET Faser	0,8	1,5	0,8	0,8	0,8	
NWT Faser	1,5	0,8	0,8	0,8	0,8	

Tabelle 4.1: Faserwechsel

Die Tabellen 4.2 und 4.3 stellen:

die Intensität(VH532, Streuhöhe 40,029km)

den Untergrund

das Verhältnis $\frac{\text{Untergrund}}{\text{Intensitaet}}$

das Verhältnis zwischen den Intensitäten der gleichzeitig verwendeten Fasern

das Verhältnis zwischen den Untergründen der gleichzeitig verwendeten Fasern

dar.

	21.05.13	09:55:54	09:55:54	12:42:00	12:42:00	15:16:03	15:16:03
Background VH532 in counts/(shot*km)		11656.3	12758.36	8572.69	19580.46	8375.55	6132.23
Signal 40.029km VH 532 in counts/(shot*km)		31.39	28.305	40.996	29.083	42.611	29.181
Faser		0.8	0.8	0.8	1.5	1.5	1.5
Teleskop	NWT	SET	SET	NWT	SET	NWT	SET
Untergrund SET/NWT VH532			0.9936528024		1.9668176747		0.764925433
Signal SET/NWT VH532			0.9017202931		0.7094106742		0.6848231677
Untergrund/Signal VH532	371.3380057343	450.7458046282	209.1104010147	673.261355431	196.558400413	210.1446146465	

	17:02:18	17:02:18	18:10:14	18:10:14
	7180.05	2600.88	1872.6	1728.31
	43.04	37.215	46.665	35.454
	1.5	0.8	0.8	0.8
NWT	SET	NWT	SET	SET
	0.3622666911		0.9229470552	
	0.8646607807		0.7597557056	
166.8227230483	69.8879484079	40.1285760206	48.7479550967	

Tabelle 4.2: Untergrund ,Signal ,Untergrund-Signal-Verhältniss, 21.05.13

	23.05.13	12:14:40	12:14:57	14:39:30	14:39:47	16:29:11	16:29:11
Background VH532 in counts/(shot*km)		6720,72	7093,63	4002,94	4723,83	4517	9664,29
Signal 40.029km VH 532 in counts/(shot*km)		48,553	36,564	44,176	34,583	57,584	30,196
Faser		0,8	0,8	1,5	0,8	0,8	1,5
Teleskop	NWT		SET	NWT	SET	NWT	SET
Untergrund SET/NWT VH532			0,9619450586		0,380620685		2,1070646473
Signal SET/NWT VH532			0,7530739604		0,7828458892		0,5243817727
Untergrund/Signal VH532	138,4202829897		194,0058527513	90,6134552698	136,5939912674	78,4419283134	320,0519936415

18:23:49	18:23:49	21:04:33	21:04:33	21:04:33	23:07:49	23:07:49
3293,94	3127,44	5036,46	5036,46	4229,04	77,79	63,45
55,377	27,723	52,375	52,375	19,564	48,406	22,283
0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
NWT	SET	NWT	SET	NWT	SET	SET
	0,9494280732		0,8397535418		0,815351775	
	0,5006230023		0,3735369928		0,4603354956	
59,4820954548	112,8103019154	96,1615274463	216,1643835616	1,6070321861	2,8474621909	

Tabelle 4.3: Untergrund ,Signal , Untergrund-Signal-Verhältnis 23.05.13

4.2.1 Referenzfaser: NWT 1,5mm

In diesem Abschnitt wird davon ausgegangen, dass das NWT bei Verwendung der 1,5mm Faser eine Überlappfunktion von genau 1 hat. Aus den relativen Intensitätsverhältnissen (normiert auf das Signal bei der Höhe von 40.029km) SET/NWT wurde die Überlappfunktion für das SET bei der Verwendung der 0,8mm und der 1,5mm Faser bestimmt (siehe 4.1 auf 20) und als Grafik dargestellt (siehe Abbildung 4.4 auf Seite 25).

4.2.1.1 SET (1,5mm Faser)

In diesem Abschnitt werden

- Intensitätsprofile des SET und NWT
- die Überlappfunktion (einschließlich des Fitts) des SET (1,5mm Faser)
- ihre Auswirkung auf die Temperatur

dargestellt.

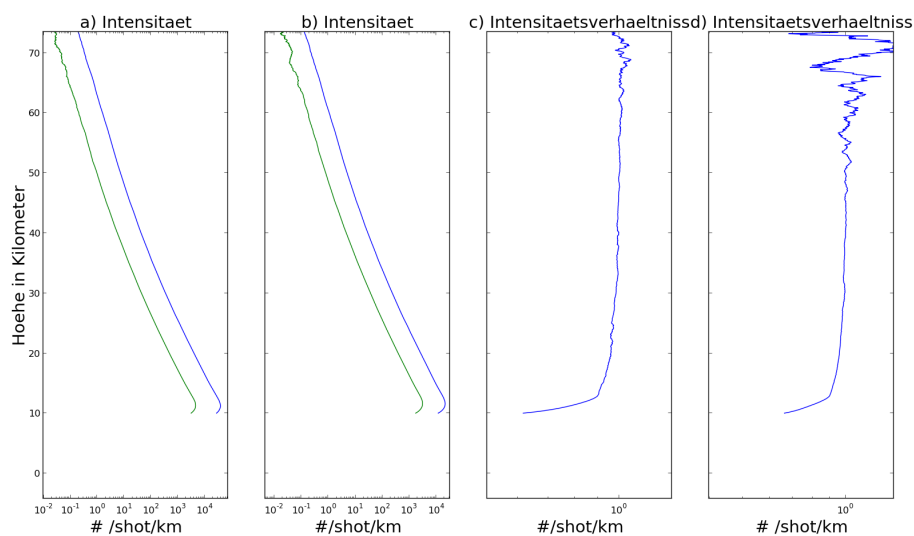


Abbildung 4.3: Die Abbildungen beschreiben:

a) NWT Intensitätsprofile (1,5mm Faser).

b) SET Intensitätsprofile (1,5mm Faser).

-grüner Graph Wellenlänge 355mm

-blauer Graph Wellenlänge 532mm.

c) Intensitätsverhältnis $\frac{SET}{NWT}$ (VH532)

d) Intensitätsverhältnis $\frac{SET}{NWT}$ (UH352)

15:16:03 21.05.13

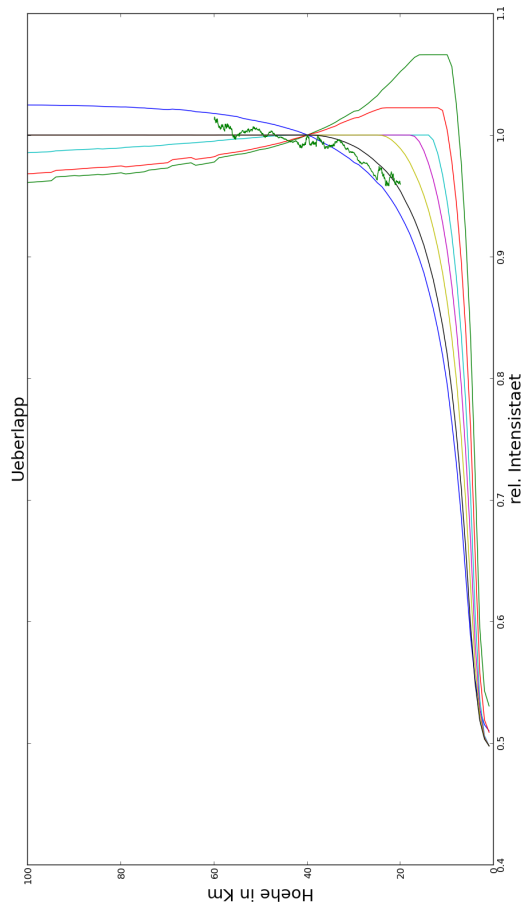


Abbildung 4.4: Überlappfunktion des SET bei der Annahme, dass die Überlappfunktion des NWT gleich 1 ist (SETfaser=1,5mm, NWTfaser=1,5mm) ($div = 125\mu rad$) (blau=-1mm, Schwarz=0mm, gelb=1mm, lila=2mm, türkis=4mm, rot=5mm, grün=6mm) 15:16:03 21.05.13

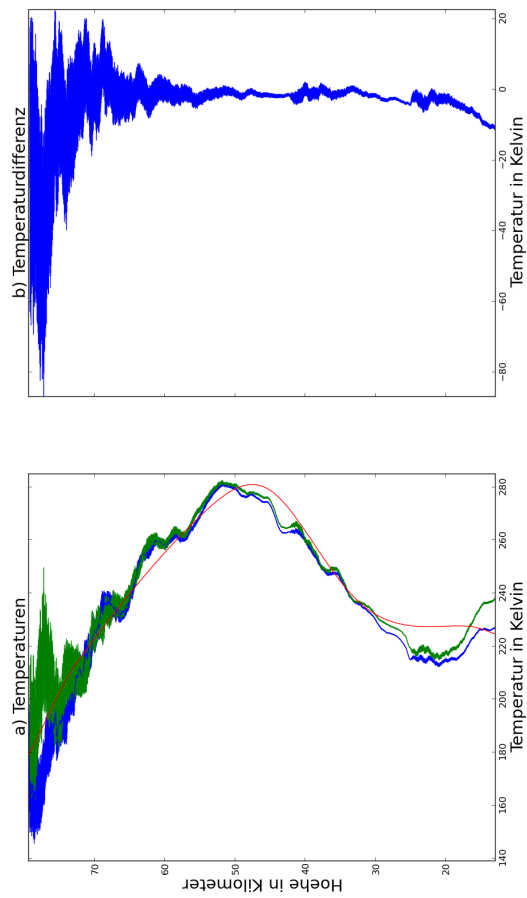


Abbildung 4.5: In der Abbildung werden 2 Plots dargestellt:

a) 3 verschiedene Temperatur Profile:

blau: NWT (1,5mm Faser)

grün: SET (1,5mm Faser)

rot: MSISE90

b) Temperaturdifferenz NWT(1,5mm Faser) - SET(1,5mm Faser)

15:16:03 21.05.13

4.2.1.2 SET (0,8mm Faser)

Es wurden zwei Überlappfunktionen (für NWT 1,5mm Faser, SET 0,8mm Faser), welche während unterschiedlichen Zeiten gemessen wurden veranschaulicht. Des weiteren wurden jeweils doppelt

- die Intensitätsprofile des SET und NWT
- die Überlappfunktion (einschließlich des Fitts) des SET (0,8mm Faser)
- ihre Auswirkung auf die Temperatur

dargestellt.

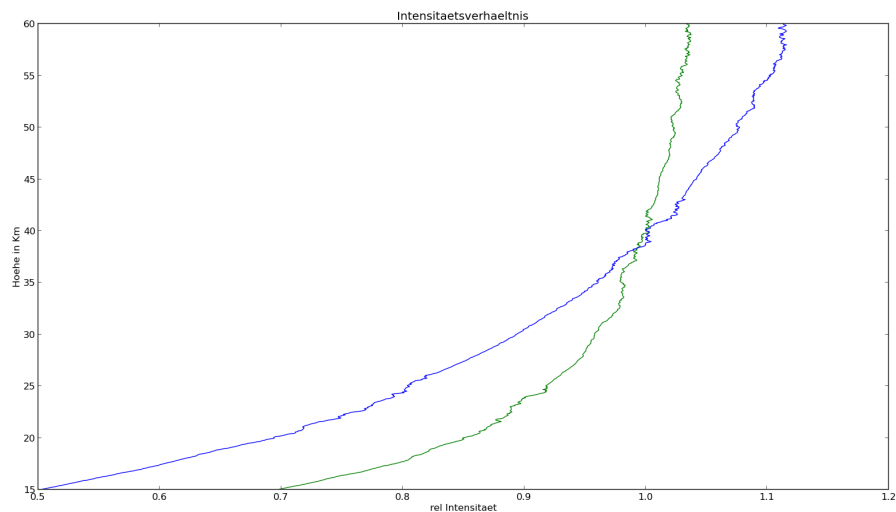


Abbildung 4.6: Es werden zwei relative Intensitätsdifferenzen zwischen SET und NWT bei gleicher Faserkonstellation dargestellt. Die zur Berechnung der Intensitätsverhältnisses verwendeten Messungen des SETs laufen mit der 0,8mm Faser und die Messungen des NWTs laufen mit der 1,5mm Faser. Dabei wurden die gleichzeitig aufgenommenen relativen Intensitätsprofile durch ein anderer dividiert ($\frac{SET}{NWT}$) und auf die Höhe von 40km normiert. Es handelt sich um Messungen, welche in Tabelle 4.2 unter anderen Messungen erwähnt wurden. (grüner Graph am 21.05.13 um 17:02:18 und blauer Graph am 23.05.13 um 14:39:30 aufgenommen.)

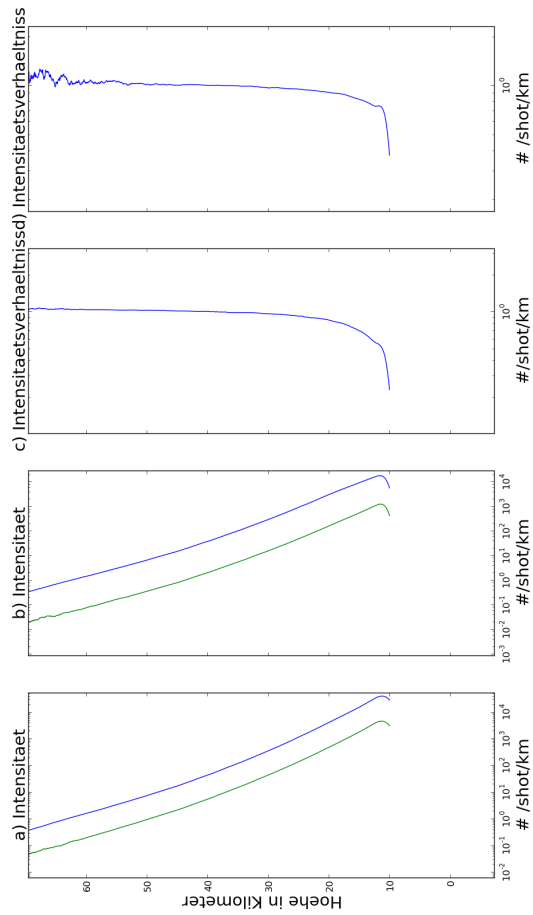


Abbildung 4.7: Die Abbildungen beschreiben:

a) NWT Intensitätsprofile (1,5mm Faser).

b) SET Intensitätsprofile (0,8mm Faser).

-grüner Graph Wellenlänge 355mm

-blauer Graph Wellenlänge 532mm.

c) Intensitätsverhältnis $\frac{SET}{NWT}$ (VH532)

d) Intensitätsverhältnis $\frac{SET}{NWT}$ (UH352)

17:02:18 21.05.13

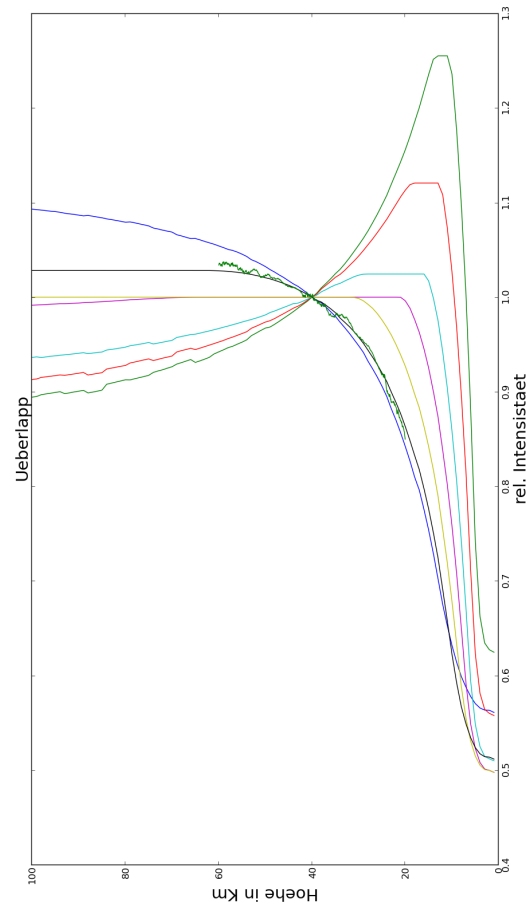


Abbildung 4.8: Überlappfunktion des SET bei der Annahme, dass die Überlappfunktion des NWT gleich 1 ist (SETfaser=0,8mm, NWTfaser=1,5mm) ($div = 60\mu rad$) (blau=-1mm, Schwarz=0mm, gelb=1mm, lila=2mm, türkis=4mm, rot=5mm, grün=6mm) 17:02:18 21.05.13

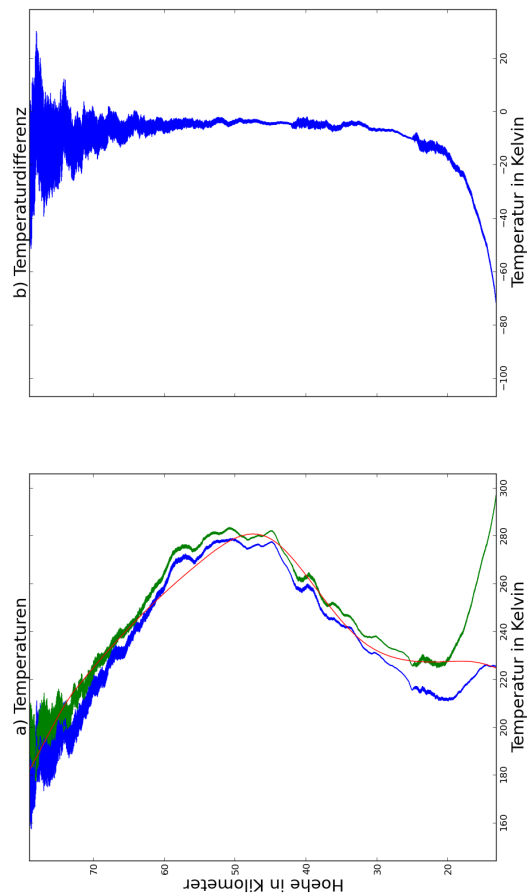


Abbildung 4.9: In der Abbildung werden 2 Plots dargestellt:

a) 3 verschiedene Temperatur Profile:

blau: NWT (1,5mm Faser)

grün: SET (0,8mm Faser)

rot: MSISE90

b) Temperaturdifferenz NWT(1,5mm Faser) - SET(0,8mm Faser)

17:02:18 21.05.13

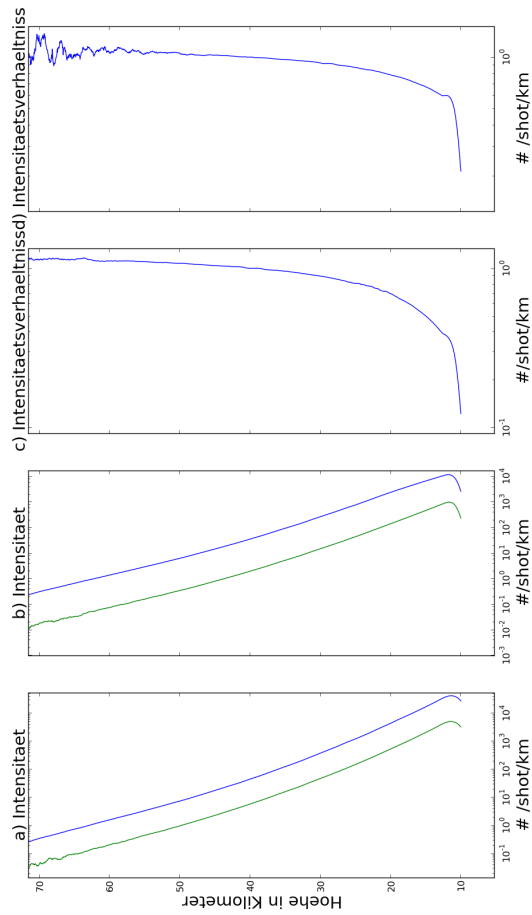


Abbildung 4.10: Die Abbildungen beschreiben:

a) NWT Intensitätsprofile (1,5mm Faser).

b) SET Intensitätsprofile (0,8mm Faser).

-grüner Graph Wellenlänge 355nm

-blauer Graph Wellenlänge 532nm.

c) Intensitätsverhältnis $\frac{S_{SET}}{S_{NWT}}$ (VH532)

d) Intensitätsverhältnis $\frac{S_{SET}}{S_{NWT}}$ (UH352)

14:39:30 23.05.13

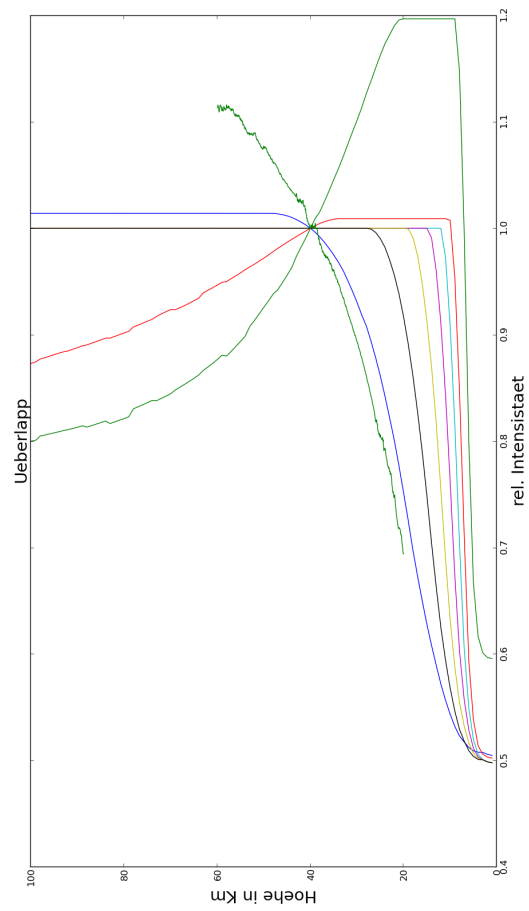


Abbildung 4.11: Überlappfunktion des SET bei der Annahme, dass die Überlappfunktion des NWT gleich 1 ist (SETfaser=0.8mm, NWTfaser=1.5mm) ($div = 20\mu rad$) (blau=-1mm, Schwarz=0mm, gelb=1mm, lila=2mm, türkis=4mm, rot=5mm, grün=6mm) 14:39:30 23.05.13

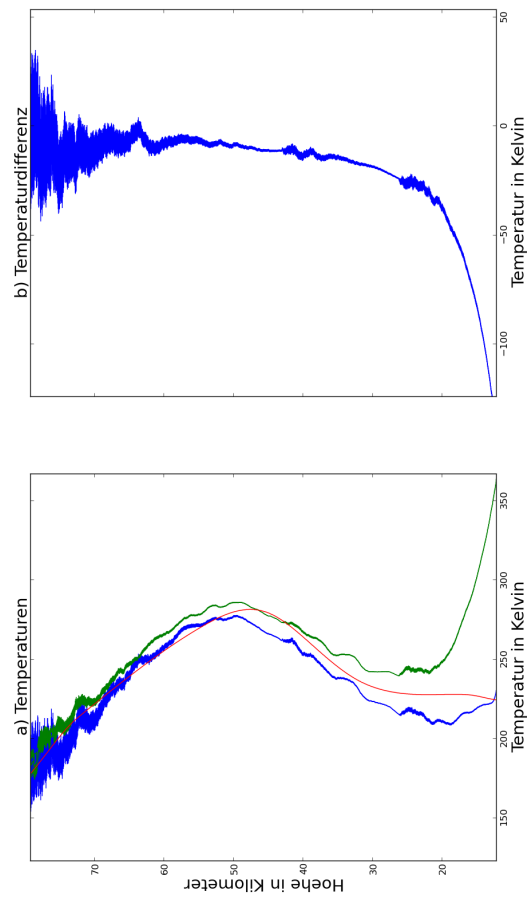


Abbildung 4.12: In der Abbildung werden 2 Plots dargestellt:

a) 3 verschiedene Temperatur Profile:

blau: NWT (1,5mm Faser)

grün: SET (0,8mm Faser)

rot: MSISE90

b) Temperaturdifferenz NWT(1,5mm Faser) - SET(0,8mm Faser)
 14:39:30 23.05.13

4.3 Analyse der Messdaten

In diesem Abschnitt werden die Messdaten und ihre Fitts analysiert. Die aus dem Raytraceverfahren gewonnen Erkenntnisse (Divergenz des Sendesystem und Faserfehlpositionierung) sollen mit Vorsicht behandelt werden. Da nicht davon ausgegangen werden kann, dass das verwendete Raytracemodell im Nahfeld des Teleskops den realen Zustand ausreichend gut annähert (siehe Abschnitt 4.1.2 auf Seite 20)

4.3.1 Überlappfunktion SET (1,5mm Faser)

Aus dem Vergleich mit den theoretischen Werten ergibt sich eine Schätzung:

- der Systemdivergenz des SET von $div = 125\mu rad$
- der Faserfehlfokussierung von 0mm

aus der Abbildung 4.4 auf Seite 25 lässt sich erkennen, dass die Faser um zwei Millimeter näher fokussiert werden sollte. Die dabei entstehende Überlappfunktion (lila Graph) liegt näher an dem ideal (UEF=1).

Die Temperaturänderung (bedingt aus der Überlappfunktion) ist bis 20km (mit der Höhe fallend) um bis zu 10K zu groß.

4.3.2 Überlappfunktion SET (0,8mm Faser)

Für die Überlappfunktion des SET (Faser 0,8mm) scheint es so als würde bei der Messung am 23.05.2013 zwischen 14:04:36 und 15:14:58 der Autofokus fehlerhaft sein, sodass die Überlappfunktion sich stark von der eigentlichen Überlappfunktion unterscheidet (siehe Abbildung 4.6 auf Seite 27 und Abbildung 4.11 auf Seite 32). Es wird angenommen, dass die Überlappfunktion aus den Messungen vom 21.05.2013 zwischen 16:41:54 und 17:22:43 näher an der Realität liegt. Auch die Fitts passen besser mit der gemessenen Überlappfunktion vom 21.05.2013 überein. Aus dem Vergleich mit den theoretischen Werten ergibt sich eine Schätzung:

- der Systemdivergenz des SET von $div = 60\mu rad$
- der Faserfehlfokussierung von 0mm

aus der Abbildung 4.8 auf Seite 29 lässt sich erkennen, dass die Faser um einen Millimeter näher fokussiert werden sollte. Die dabei entstehende Überlappfunktion (gelber Graph) liegt näher an dem ideal (UEF=1).

Die Temperaturänderung (bedingt aus der Überlappfunktion) ist bis 25km (mit der Höhe fallend) um bis 65K zu groß.

4.3.3 Beurteilung des Raytraceverfahrens

Das Raytracemodell nähert den planaren Primärspiegel mit einer Linse an und somit kann vor allem im Nahfeld des Teleskops nicht davon ausgegangen werden, dass das Modell den realen Zustand ausreichend gut annähert. Im Nahfeld passen die theoretischen

Modelle der Überlappfunktionen nur unzureichend mit den gemessenen Überlappfunktionen überein. Der untere Bereich der theoretischen Überlappfunktion ($<20\text{km}$) wurde beim Fitt nicht berücksichtigt.

Ein weiteres Indiz dafür, dass das Raytracemodell den realen Zustand nicht ausreichend gut annähert, sind die aus dem Fitt resultierenden unterschiedlichen Systemdivergenzen des SET. $div_{SET} =$

- $60\mu\text{rad}$ (bestimmt über die 0,8mm Faser)
- $125\mu\text{rad}$ (bestimmt über die 1,5mm Faser)

4.3.4 Vergleich der Teleskopjustierung und der Faser

4.3.4.1 Vergleich der Qualität der Teleskopjustierung

In diesem Abschnitt wird das SET mit dem NWT verglichen.

Laut Tabellen 4.2 und 4.3 auf Seiten 22 und 23 ist das Signal des NWT bei gleicher Faserkonstellation im Durchschnitt 1,723fach größer als das Signal des SET. Der Untergrund (das Rauschen) des NWT ist im Durchschnitt nur 1,112fach größer als beim SET. Damit ist das Signal-Rausch-Verhältnis beim NWT um das 1,550fache größer und damit besser.

4.3.4.2 Vergleich der Fasern

In diesem Abschnitt werden die Fasern (0,8mm und 1,5mm) mit einander verglichen. Dabei ist das Signal bei Benutzung der 0,8mm Faser im Durchschnitt um das 1,241fach größer als bei Benutzung der 1,5mm Faser (die Signalstärke hängt jedoch stärker vom verwendeten Teleskop als von der Faser ab). Der Untergrund (das Rauschen) ist erwartungsgemäß bei Verwendung der 0,8mm Faser um das 1,634fache kleiner als bei der Verwendung der 1,5mm Faser. Daraus ergibt sich bei Verwendung der 0,8mm Faser ein um das 2,028fache größeres und damit besseres Signal-Rausch-Verhältnis.

Kapitel 5

Zusammenfassung und Ausblick

5.1 Zusammenfassung

Aus den Untersuchungen resultiert, dass die 0,8mm Faser ein ca. doppelt so großes Signal-Rausch-Verhältnis wie die 1,5mm Faser vorweisen kann. Dabei ergibt sich aus den Überlappfunktionen, dass das SET für die Verwendung der 0,8mm Faser besser justiert werden muss, um im unterem Bereich der mittleren Atmosphäre (bis 20km) fehlerfrei Messungen liefern zu können.

Die mit Vorsicht zu behandelnden Ergebnisse aus dem Fitt(aus dem Vergleich mit den Raytracemodellen gewonnen) ergeben, dass das SET bei Verwendung der 0,8mm Faser um 1mm und bei Verwendung der 1,5mm Faser um 2mm in Richtung Brennpunktes nach fokussiert werden müsste.

Es lässt sich vermuten, dass das NWT gut genug justiert ist, sodass die Überlappfunktion vom NWT(für die 1,50mm Faser) als annähernd 1 angenommen werden kann. Die Berechnungen ergibt ein 1,55fach größeres Signal-Rausch-Verhältnis als beim SET. Außerdem ähneln die Temperatur des NWT auch im unterem Lidarmessbereich (10-15km) dem MSISE90-Modell.

Die theoretischen Überlappfunktionen (gewonnen aus dem Raytraceverfahren) nähern im Nahfeld des Teleskops das reale System nicht ausreichend gut an.

5.2 Ausblick

Um die Abschätzung der aus den Überlappfunktionen gewonnene Divergenz und Faserfehlfokussierung zu verbessern, müsste man das theoretische Modell verbessern. Auch im Nahfeld des Teleskops müsste das reale System ausreichend angenähert werden.

Es sollten weitere Messungen mit den neuen Faserfokussierungen durchgeführt werden. Die daraus resultierenden Überlappfunktionen müssten näher am Ideal ($UEF=1$) liegen (bzw. zumindest über die Höhe konstant bleiben).

Sollten in Zukunft noch kleinere Fasern zur Minimierung des Untergrunds verwendet werden, könnten die Defokussierungseffekte der Teleskope durch eine adaptive Optik minimiert werden.

Quellenverzeichnis

- [1] Häger Holste. Aufbau einer tageslichtfähigen nachweisbank für ein rayleigh-lidar. Master's thesis, Universität Rostock, 2007.
- [2] <http://www.iap-kborn.de/ALOMAR-RMR-Lidar.129.0.html>.
- [3] Gerd Baumgarten. *Leuchtende Nachtwolken an der polaren Sommermesopause: Untersuchungen mit dem Alomar Rayleigh/Mie/Raman Lidar*. PhD thesis, Universität Bonn, 2001.
- [4] Armin Schöch. *Thermal structure and Gravity waves in the Arctic middle atmosphere above ALOMAR*. PhD thesis, Universität Rostock, 2007.
- [5] Fiedler und von cossart, 1999.
- [6] Julia Amthor. Erweiterung und optimierung der datenerfassung des alomar rmr-lidar. Master's thesis, Technischen Universität Hamburg-Harburg, 2006.
- [7] Frank Hübner. *Temperatures der mittleren polaren Atmosphäre (15–80 km): Beobachtungen mit dem ALOMAR Rayleigh/Mie/Raman-Lidar 1995 und 1996 und Vergleiche*. PhD thesis, Institut für Atmosphärenphysik an der Universität Rostock e. V., 1998.
- [8] <http://www.ukssdc.ac.uk/wdcc1/msise90.html>.

Eidesstattliche Versicherung

Ich versichere hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig angefertigt und ohne fremde Hilfe verfasst habe, keine außer den von mir angegebenen Hilfsmitteln und Quellen dazu verwendet habe und die den benutzten Werken inhaltlich und wörtlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Rostock, (Datum)