

**Universität  
Rostock**



Traditio et Innovatio

---

# **Analyse der Fokusslage und deren Auswirkung auf die Rückstreupprofile des ALOMAR RMR-Lidars**

---

**Bachelorarbeit**

**angefertigt am Institut für Physik der Universität Rostock  
in Zusammenarbeit mit dem Leibniz-Institut für  
Atmosphärenphysik (IAP)**



von

Lukas Emanuel Haizmann



1. Prüfer: Prof. Dr. Franz-Joseph Lübken
2. Prüfer: Dr. Gerd Baumgarten

Eingereicht am 18. August 2014.



## **Zusammenfassung**

Während einer Lidarmessung über viele Stunden sind die Empfangsteleskope oft großen Schwankungen der Außentemperatur sowie teilweise direkter Sonnenbestrahlung ausgesetzt. Dadurch kommt es zu thermischen Längenänderungen der Teleskopkonstruktion und Verschiebungen der gesamten Optik. Das hat eine Defokussierung zur Folge, wodurch das aus der Atmosphäre zurückgestreute Licht nicht optimal in die zur Weiterleitung verwendete Glasfaser eingekoppelt wird. Deshalb ist es wichtig, dass dieser Effekt mit Hilfe eines Autofokus-Systems durch eine gezielte Positionierung der Faser kompensiert wird.

Das RMR-Lidar auf der Forschungsstation ALOMAR im Norden Norwegens besitzt seit 2007 ein solches Autofokus-System zur Korrektur von temperaturbedingten Fokussverschiebungen. Gegenstand dieser Arbeit ist es, die Fokusslage des ALOMAR RMR-Lidars zu untersuchen. Dafür wird der integrierte Autofokus vorgestellt, und mit Hilfe von System- und Messdaten aus den Jahren 2013 und 2014 wird analysiert, ob dieser zuverlässig arbeitet. Der Einfluss direkter Sonnenbestrahlung wird anhand einer Sommermessung dargestellt. Die Grenze der Reichweite des Motors zur Positionierung der Glasfaser wird an einer Wintermessung veranschaulicht. Außerdem wird gezeigt, dass es bei der Korrektur zu zeitlichen Verzögerungen kommt, was zu einer ungenauen Fokussierung führt. Zur Überprüfung der Korrekturfunktionen wird eine theoretische Berechnung angestellt. Im letzten Kapitel wird zusätzlich noch die Auswirkung des Fokus auf die Rückstreusignale des Lidars und damit auch auf die daraus abgeleiteten Temperaturprofile analysiert.

Als Ergebnis der Arbeit können einige Optimierungen des Autofokus-Systems vorgeschlagen werden. Dadurch kann über lange Messungen hinweg eine exaktere Fokusskorrektur garantiert werden. Das minimiert den Verlust von Rückstreusignal sowie die Abweichungen in den berechneten Temperaturprofilen.



# Inhaltsverzeichnis

|          |                                                              |           |
|----------|--------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einführung</b>                                            | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>Grundlagen</b>                                            | <b>3</b>  |
| 2.1      | Die Atmosphäre . . . . .                                     | 3         |
| 2.2      | Das Lidar-Messprinzip . . . . .                              | 4         |
| 2.2.1    | Streumechanismen . . . . .                                   | 6         |
| 2.2.2    | Lidargleichung . . . . .                                     | 7         |
| 2.2.3    | Rayleigh-Temperaturmessung . . . . .                         | 8         |
| 2.3      | Das ALOMAR RMR-Lidar . . . . .                               | 9         |
| 2.3.1    | Die Teleskope . . . . .                                      | 12        |
| 2.3.2    | Die Fokalbox . . . . .                                       | 13        |
| <b>3</b> | <b>Datenanalyse, Berechnung, Auswertung</b>                  | <b>15</b> |
| 3.1      | Untersuchungen zum Autofokus des ALOMAR RMR-Lidars . . . . . | 15        |
| 3.1.1    | Erwärmung der Stangen durch Sonneneinstrahlung . . . . .     | 17        |
| 3.1.2    | Grenzen des Autofokus . . . . .                              | 19        |
| 3.1.3    | Verzögerung der Fokuskorrektur . . . . .                     | 20        |
| 3.2      | Theoretische Berechnung zur Fokusverschiebung . . . . .      | 22        |
| 3.3      | Vergleich zwischen Modell und Autofokus . . . . .            | 25        |
| 3.4      | Auswirkungen des Fokus auf das Lidar-Signal . . . . .        | 27        |
| <b>4</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick</b>                          | <b>33</b> |
|          | <b>Abbildungsverzeichnis</b>                                 | <b>35</b> |
|          | <b>Literaturverzeichnis</b>                                  | <b>37</b> |





# Kapitel 1

## Einführung

Bei der Erforschung der geophysikalischen Vorgänge auf der Erde kommt der Atmosphärenphysik eine besondere Aufgabe zu. Der Forschungsgegenstand, die gasförmige Hülle unseres Planeten, ist oberhalb von 30 km für Messungen nur schwer erreichbar. Daraus ergeben sich viele Herausforderungen bei der Entwicklung von zuverlässigen Messmethoden. Insbesondere bei Instrumenten, mit denen physikalische Größen über große Distanzen präzise bestimmt werden sollen, kommt es auf eine hohe Genauigkeit bei deren Aufbau und Konstruktion an. Um ein brauchbares Signal aus einer Entfernung von bis zu 100 km zu registrieren, muss die Empfangstechnik effizient aufgebaut sein. Deshalb ist die Entwicklung und Weiterentwicklung von leistungsfähigen Fernerkundungssystemen ein wichtiger Aspekt im Fortschritt der Atmosphärenphysik sowie der Geophysik als Ganzes. Denn in der Atmosphäre laufen viele Prozesse ab, die letztendlich den Zustand der Umwelt, unter anderem das Klima auf der Erdoberfläche, stark beeinflussen und für ein grundlegendes Verständnis von großer Bedeutung sind.

Das Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik (IAP) in Kühlungsborn ist eine Forschungseinrichtung, die sich seit vielen Jahren mit der Erkundung der mittleren Atmosphäre in einem Höhenbereich zwischen 10 km und 100 km beschäftigt. Dabei kommen verschiedenste Sondierungsinstrumente zum Einsatz, die sich in der Art der Registrierung von Messgrößen grundlegend unterscheiden. Zum einen können mit Hilfe von Ballons und Raketen *in situ*<sup>1</sup>-Messungen vorgenommen werden, die eine sehr genaue Momentaufnahme eines bestimmten Bereichs liefern. Zusätzlich dazu dienen Radar- und Lidargeräte zur dauerhaften Fernerkundung über größere Bereiche hinweg. Mit diesen unterschiedlichen Geräten ist es möglich, ein umfassendes Bild der Physik der Atmosphäre zu erhalten und dieses mit theoretischen Modellen und Simulationen zu vergleichen und zu ergänzen.

Da der Zustand und die Dynamik der Atmosphäre global gesehen sehr variabel sind, müssen Untersuchungen in unterschiedlichen Breiten durchgeführt werden. Dazu dienen mobile Messinstrumente und kleinere Forschungsstationen, die an Orten errichtet werden, an denen bisher noch wenig geforscht wurde oder die von besonderem Interesse sind. Im Norden Norwegens, nördlich des Polarkreises befindet sich

---

<sup>1</sup>lat.: *am Ort*

---

auf der Insel Andøya (69°N, 16°E) die Forschungsstation ALOMAR (*Arctic Lidar Observatory for Middle Atmosphere Research*), an deren Betrieb das IAP maßgeblich beteiligt ist. Sie wurde 1994 auf einem 380 m hohen Berg erbaut und dient seitdem als wichtiger Standort zur Untersuchung der Atmosphäre in arktischen Breiten, zumal sich in unmittelbarer Nähe zusätzlich noch mehrere Radargeräte, sowie die Raketenbasis *Andøja Rocket Range* befinden. Kernstück des Observatoriums ist das sogenannte RMR-Lidar, mit welchem seit 1995 kontinuierliche Messungen über einen großen Höhenbereich möglich sind. Es können unter anderem Aerosoleigenschaften gemessen, Dichte-, Temperatur- und Windprofile aufgenommen und atmosphärische Erscheinungen, wie z.B. Schwerewellen und leuchtende Nachtwolken (*noctilucent clouds*, *NLC*) untersucht werden. Das Gerät kann über das ganze Jahr genutzt werden und läuft zu einem großen Teil automatisiert. Trotzdem wird es seit seiner Installation ständig weiterentwickelt und optimiert, um Prozesse auf verschiedenen zeitlichen Skalen aufnehmen zu können. Dadurch gehört es zu den leistungsfähigsten Lidar-Systemen seiner Art.

Eine Besonderheit des ALOMAR RMR-Lidars ist es, durch eine hohe räumliche Auflösung Messungen sowohl bei Nacht wie am Tag durchführen zu können und trotz einer starken Hintergrundstrahlung der Sonne ein gutes Signal zu erhalten. Denn in den Sommermonaten bleibt die Sonne in Breiten nördlich des Polarkreises den ganzen Tag über dem Horizont. Für eine zuverlässige Bestimmung von Dichte- und Temperaturprofilen ist es also unter anderem wichtig, dass die Empfangsteleskope des Lidars das aus der Atmosphäre zurückgestreute Licht möglichst optimal einfangen und weiterleiten. Dafür muss während langen Messungen über viele Stunden und unter Umständen mehrere Tage eine möglichst exakte Fokussierung gewährleistet sein. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Fokus der beiden Teleskope des ALOMAR RMR-Lidars untersucht. Dafür wird das integrierte Autofokussystem beschrieben, analysiert und mit einer theoretischen Berechnung verglichen. Außerdem wird anhand von Lidar-Daten aus den Jahren 2013 und 2014 die Auswirkung der Fokussierung auf das empfangene Signal und somit auch auf die daraus abgeleiteten Temperaturprofile überprüft.

# Kapitel 2

## Grundlagen

### 2.1 Die Atmosphäre

Unsere Erde wird von einer Art Hülle, einer gasförmigen Schicht umgeben, die als (Erd-)Atmosphäre bezeichnet wird. Diese Gashülle erstreckt sich von der Erdoberfläche bis in eine Höhe von mehreren hundert Kilometer und wird durch die Gravitationskraft festgehalten. Die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre ist unterhalb von 100 km annähernd konstant, weshalb man diesen Bereich auch oft als *Homosphäre* bezeichnet. Sie besteht hauptsächlich aus Stickstoff (78%), Sauerstoff (21%) und Argon (1%). Dazu kommen vor allem in niedrigen Höhen sogenannte Aerosolpartikel, kleine flüssige oder feste Teilchen, die mit dem Gas der Atmosphäre eine Suspension bilden. Außerdem sind noch viele verschiedene Spurengase in der Atmosphäre zu finden, wie z.B. Ozon oder das Treibhausgas  $CO_2$ .

Trotz der chemischen Homogenität lässt sich die Atmosphäre auch in den unteren Bereichen in mehrere Schichten unterteilen. Dies wird anhand des vertikalen Temperaturprofils und des mit der Höhe variierenden Temperaturgradienten gemacht. Dabei endet eine Atmosphärenschicht jeweils an dem Punkt, an dem das Temperaturprofil ein Maximum aufweist und der Gradient sein Vorzeichen wechselt. Der Verlauf und die Bezeichnungen der einzelnen Schichten bis in eine Höhe von über 100 km ist in Abbildung 2.1 dargestellt. Innerhalb der *Troposphäre* nimmt die Temperatur mit zunehmender Höhe zunächst ab, was sich z.B. durch die niedrigen Temperaturen in hohen Gebirgen

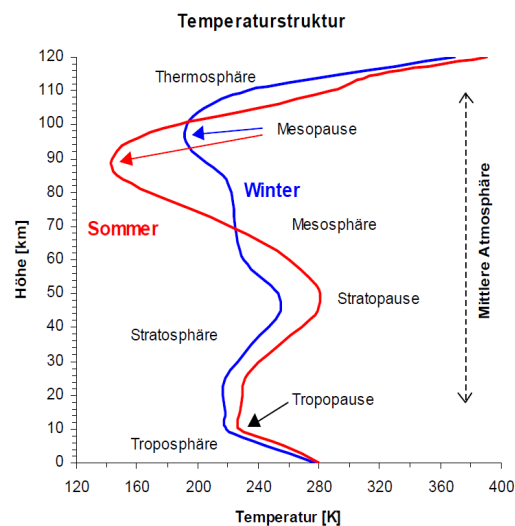


Abbildung 2.1: Mittleres Temperaturprofil der Atmosphäre bis 120 km im Sommer und im Winter. Die Daten stammen aus der Modellatmosphäre CIRA86. (Quelle: Schöch, 2001)

bemerkbar macht. Sie nimmt dann im Bereich zwischen 10 km und 50 km, in der *Stratosphäre*, wieder stark zu und erreicht ein Maximum. Innerhalb der *Mesosphäre* kommt es zu einer starken Abkühlung mit steigender Höhe, ehe sich der Verlauf ab ca. 100 km wieder umkehrt. Die Übergangsbereiche werden hierbei als *Pausen* bezeichnet. So liegt z.B zwischen der *Mesosphäre* und der *Thermosphäre* die *Mesopause*, in deren Höhenbereich sich im Sommer in arktischen Breiten die NLCs bilden können, indem Wasserdampf gefriert und Eisschichten bildet (Lübken *et al.*, 1996).

## 2.2 Das Lidar-Messprinzip

Die Bezeichnung Lidar steht für *Light Detection and Ranging*. Sie wurde von *Middleton, W. E. K., Spilhaus, A. F.* (1954) erstmals verwendet und ist von der Bezeichnung Radar (*Radio Detection and Ranging*) abgeleitet. Im Unterschied zu Radargeräten werden bei Lidars also anstatt langwelliger Radiosignale Lichtsignale verwendet. Schon vor der Erfindung von Lasern wurden z.B. von *Tuve et al.* (1935) Lidarmessungen zur Bestimmung von Dichteprofilen in der Atmosphäre durchgeführt und beschrieben. Mit der Erfindung der ersten leistungsfähigen Laser-Systeme in den 60er Jahren erhielt die Entwicklung von Lidars jedoch einen gewaltigen Schub, und seitdem werden sie immer wichtiger als Fernerkundungsinstrument. Sie sind für die Erforschung der Atmosphäre von enormer Bedeutung, da sie einen Höhenbereich abdecken können, in dem keine Radarmessungen möglich sind (Abbildung 2.2).

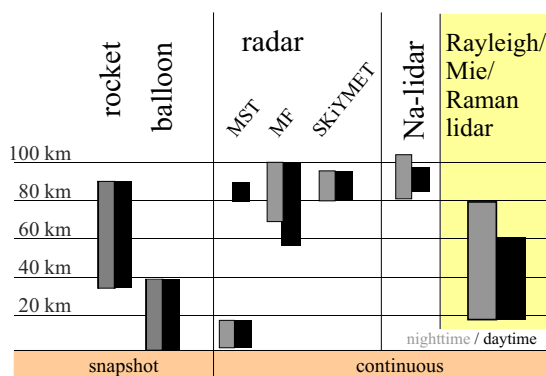


Abbildung 2.2: Höhenabdeckung verschiedener Sondierungsgeräte zur Windmessung. In einem Bereich zwischen ca. 20 km und 60 km sind mit Radargeräten keine Messungen möglich. Lidargeräte, wie z.B. das ALOMAR RMR-Lidar, können hingegen genau diesen Höhenbereich abdecken und sind deshalb sehr wichtig für die Erforschung der mittleren Atmosphäre. (Quelle: Baumgarten, 2010)

Die Messmethode des Lidars beruht auf dem physikalischen Phänomen der Streuung von Lichtwellen an Atomen, Molekülen und kleinen Teilchen. Ausgesendetes Licht wird an den Bestandteilen der Atmosphäre in unterschiedlichen Höhen und auf unterschiedliche Weise gestreut. Ein gewisser Teil des Lichts wird dabei unter einem Winkel von  $180^\circ$  gestreut und kann somit am Ort der Lichtaussendung registriert und untersucht werden. Über die Laufzeit des Lichtes zwischen Aussendung und Registrierung kann die Distanz zum Ort der Streuung bestimmt werden. Aus den spektralen Eigenschaften und der Intensität des gestreuten Lichtes lassen sich die physikalischen Parameter der Atmosphäre ableiten. Im Folgenden wird der allgemeine Aufbau des Gerätes (Abbildung 2.3) beschrieben und näher auf die Funk-

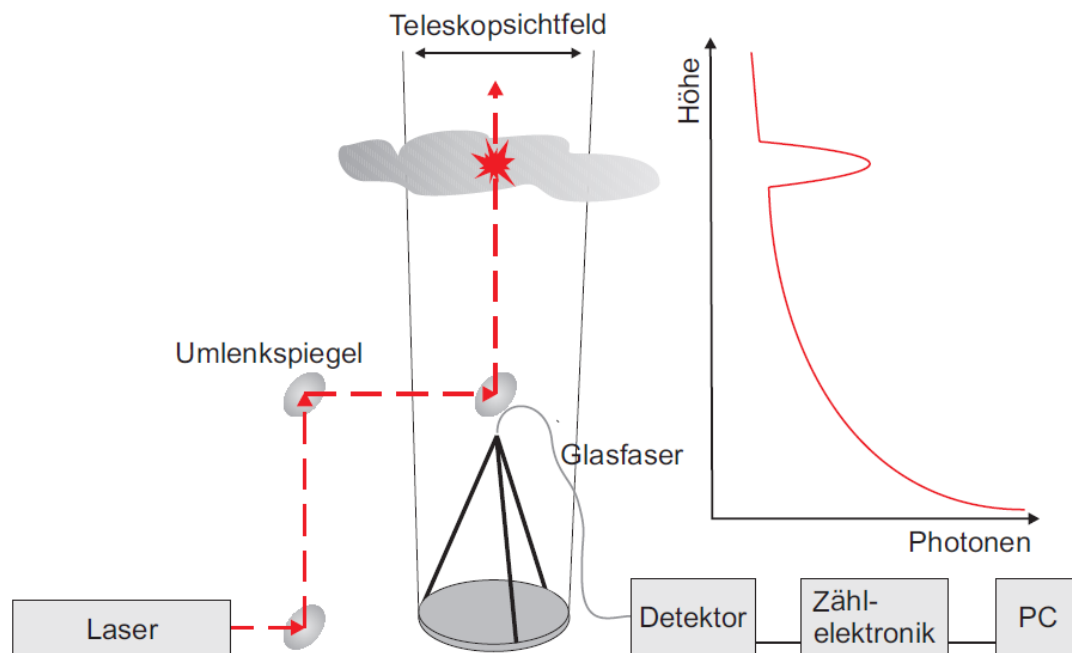


Abbildung 2.3: Allgemeiner Aufbau eines Lidar-Systems. Im *Sendezweig* werden die Lichtpulse aus dem Laser über ein Spiegelsystem in die Atmosphäre geleitet. Der *Transferzweig* fängt das zurückgestreute Licht mit einem Teleskop ein. Dieses fokussiert das Licht auf eine Glasfaser, durch die es zum *Nachweiszweig* gelangt. Dort wird es von Detektoren registriert und über eine Software ausgewertet. (Quelle: Lautenbach, 2007)

tionsweise eingegangen.

Ein Lidar-System setzt sich im Normalfall aus drei Hauptbestandteilen zusammen. Zunächst werden im *Sendezweig* mit Hilfe von Lasern hochkohärente Lichtpulse mit einer zeitlichen Länge im ns-Bereich erzeugt. Da es für eine spektrale Analyse der Messdaten notwendig ist, dass der Laser eine ganz bestimmte, stabile Wellenlänge emittiert, werden hierbei unterschiedliche Methoden zur spektralen Stabilisierung eingesetzt. Die verwendeten Wellenlängen in Lidars reichen, je nach Anwendung, vom infraroten Bereich über das sichtbare Spektrum bis in den UV-Bereich. Das erzeugte Licht wird über optische Systeme meist aufgeweitet und mit hoher Präzision sowie möglichst geringer Strahldivergenz in die Atmosphäre ausgesendet. Dabei ist es sehr wichtig, dass der Strahl richtig ausgerichtet ist, da schon geringe Abweichungen von der vorgesehenen Achse in vielen Kilometern Höhe schnell zu Ungenauigkeiten von mehreren Metern führen können.

Der *Transferzweig*, der aus einem großen Spiegelteleskop besteht, fängt das gestreute Licht ein und fokussiert es auf das Ende einer Glasfaser, in die es durch die Fokussierung möglichst vollständig eingekoppelt wird. Da das Streulicht sowohl aus wenigen Kilometern Höhe als auch aus knapp 100 km Höhe kommt, werden die ankommenden Strahlen vom Teleskop jedoch nicht auf die gleiche Ebene fokussiert. Dieser Umstand limitiert ein Lidar maßgeblich in seinem Messbereich. Die Position der

Glasfaser muss also so gewählt werden, dass trotzdem Strahlen aus einem möglichst großen Höhenbereich ohne Verluste in die Faser eingekoppelt werden. Den Bereich des Strahls, der vollständig in die Faser eingekoppelt werden kann, bzw. scharf abgebildet werden kann, nennt man Fokustiefe. Die Fokustiefe bestimmt wiederum den Höhenbereich, den das Lidar ohne große Signalverluste abdecken kann, die Schärfentiefe (*depth of field*, *DOF*). Bei der Anordnung von Laserstrahl und Empfangsteleskop muss darauf geachtet werden, dass der zurückgestreute Strahl komplett im Gesichtsfeld (*field of view*, *FOV*) des Teleskops liegt. Ist dies nicht der Fall, so geht ein Teil des Lichts an der Glasfaser vorbei und es kommt zu Signalverlusten. Der Anteil des Laserstrahls, der mit dem FOV des Teleskops zusammenfällt wird Überlapp genannt. Dieser beträgt im Idealfall 100%, ist in der Praxis aber nicht konstant und kann durch eine entfernungsabhängige Überlappfunktion beschrieben werden. Durch eine automatische Strahlstabilisierung und Fokuskorrektur kann der Überlapp im Verlauf einer langen Messung optimiert werden. Die genaue Funktionsweise dieser Systeme wird in Abschnitt 2.3.2 anhand des ALOMAR RMR-Lidars erläutert. Es gibt Lidar-Anordnungen, bei denen der Laserstrahl biaxial zur optischen Achse des Empfangsteleskops ausgerichtet ist. Eine andere Möglichkeit besteht in einer koaxialen Anordnung. Hier liegt der Laserstrahl genau in der optischen Achse des Teleskops. Diese Anordnung bietet gewisse Vorteile gegenüber der biaxialen Anordnung im Hinblick auf den Überlapp in niedrigen Höhen.

Die Glasfaser leitet das Licht weiter zum *Nachweiszweig*. Dieser besteht aus einer optischen Bank, auf der das eingefangene Lichtsignal spektral und zeitlich aufgetrennt und jeweils auf verschiedene Nachweiskanäle geleitet wird. In den Nachweiskanälen wird das Licht dann registriert und in ein elektronisches Signal umgewandelt, das wiederum von einer Software verarbeitet werden kann. Durch die Auftrennung ist es möglich, aus einem Signal eine Vielzahl an Informationen zu gewinnen und mit einer einzelnen Messung viele verschiedenen Parameter der Atmosphäre zu untersuchen.

### 2.2.1 Streumechanismen

Wenn die ausgesendeten Lichtwellen des Lidars auf die Teilchen der Atmosphäre treffen, können unterschiedliche Streuprozesse auftreten. Dabei wird zwischen elastischen und inelastischen Streuprozessen unterschieden. Bei ersteren ist die Wellenlänge des gestreuten Lichts gleich der des eingestrahlten Lichts. Bei inelastischer Streuung von Licht kommt es dagegen zu einer Wellenlängenverschiebung. Für Lidar-Messungen spielen elastische wie inelastische Streuprozesse eine Rolle.

Der Streuprozess mit dem größten Wirkungsquerschnitt ist die ***Resonanz-Streuung***. Ein Photon trifft auf eine Atom oder ein Molekül, wird absorbiert und regt dadurch in diesem ein reelles höheres Energieniveau an. Das Atom bzw. Molekül relaxiert direkt wieder in den Grundzustand und sendet ein Photon mit der gleichen Wellenlänge wie das absorbierte Photon aus. Dieser elastische Streuprozess wird z.B. in

K-Lidars zur Bestimmung von Dichte- und Temperaturprofilen genutzt (*Höffner and Lübken*, 2007).

Bei der **Cabannes-Streuung** handelt es sich ebenfalls um einen elastischen Prozess. Hierbei kommt es jedoch zur Anregung in ein virtuelles höheres Energieniveau. Beim Übergang zurück in den Grundzustand wird auch hier wieder ein Photon der eingestrahnten Wellenlänge ausgesendet.

Die **Raman-Streuung** ist ein inelastischer Prozess, bei dem ein virtuelles Energieniveau angeregt wird. Dabei unterscheidet man zwischen **Rotations-Raman-** und **Vibrations-Raman-Streuung**. Bei ersterer ändert sich bei der Relaxation der Rotationszustand eines Moleküls. Besitzt das Photon nach der Streuung eine größere Wellenlänge, so spricht man von *Stokes-Streuung*; wird die Wellenlänge kleiner, spricht man von *Anti-Stokes-Streuung*. Die Wellenlängenverschiebungen befinden sich im *nm*-Bereich und der Wirkungsquerschnitt ist sehr klein. Bei der *Vibrations-Raman-Streuung* ändert sich entsprechend der Vibrationszustand des Moleküls.

Die **Rayleigh-Streuung** setzt sich nach *Young* (1981) aus der *Cabannes-* und der *Rotations-Raman-Streuung* zusammen. Der Wirkungsquerschnitt ist proportional zu  $\lambda^{-4}$ , weshalb bei Rayleigh-Lidars oft UV-Licht verwendet wird, z.B. bei *Hongfang and Fan* (2006).

**Aerosol-Streuung** nennt man die elastische Streuung von Licht an flüssigen oder festen Teilchen, deren Größe gleich oder größer als die Wellenlänge des Lichts ist. Bei sphärischen Teilchen sagt man nach *Mie* (1908) auch **Mie-Streuung**. Die *Rayleigh-Streuung* ist der Grenzfall der *Aerosol-/Mie-Streuung* für kleine Teilchen.

### 2.2.2 Lidargleichung

Das aus einer bestimmten Höhe empfangene Lidar-Signal kann durch die *Lidargleichung* beschrieben werden. In ihrer einfachsten Form sieht diese folgendermaßen aus<sup>1</sup>:

$$P(R) = K \cdot G(R) \cdot \beta(R, \lambda) \cdot T(R, \lambda) \quad (2.1)$$

Dabei ist  $P(R)$  die Leistung, die aus der Entfernung  $R$  empfangen wird.

$K = P_0(c\tau/2)A\eta$  ist eine System-Konstante, die nur von den Eigenschaften des Lidars und nicht von der Höhe  $R$  abhängt.  $P_0$  ist die durchschnittliche Leistung eines Laserpulses,  $c$  die Lichtgeschwindigkeit,  $\tau$  die zeitliche Länge eines Pulses,  $A$  die Fläche des Primärspiegels des Teleskops, mit dem das gestreute Licht eingefangen wird und  $\eta$  der Wirkungsgrad des Systems.

Der zweite Faktor  $G(R) = O(R)/R^2$  ist ein geometrischer Faktor; er ist ebenfalls allein durch das Lidar festgelegt, aber von der Höhe  $R$  abhängig. Dabei ist  $O(R)$  die in Abschnitt 2.2 bereits angesprochene vertikale Überlappfunktion, die den Überlapp zwischen dem Laserstrahl und dem FOV des Teleskops angibt. Sie kann experimentell oder über eine *raytracing*-Simulation bestimmt werden.

---

<sup>1</sup>Quelle: *Weitkamp* (2005), S. 6

Die letzten beiden Terme sind durch die Eigenschaften der Atmosphäre bestimmt, die von dem Licht des Lidars getroffen wird.  $\beta(R, \lambda)$  ist der Rückstreuungskoeffizient, der angibt, welcher Anteil des ausgesendeten Lichts unter einem Winkel von  $180^\circ$  zurück zum Lidar gestreut wird.  $T(R, \lambda)$  ist der Transmissionskoeffizient, der angibt, wie viel Licht auf dem Weg vom Lidar zum Ort der Streuung und wieder zurück verloren geht. Diese beiden Koeffizienten sind außerdem auch von der Wellenlänge des verwendeten Lichtes abhängig und bestimmen maßgeblich das gemessene Lidarsignal.

### 2.2.3 Rayleigh-Temperaturmessung

Mit Lidars für die mittlere Atmosphäre lassen sich vertikale Temperaturprofile bestimmen. Dabei gibt es einige unterschiedliche Methoden, die für verschiedene Höhenbereiche geeignet sind. In aerosolfreien Schichten der Atmosphäre lassen sich Temperaturprofile mit Hilfe der *Rayleigh-Streuung* ermitteln. Das ist in der mittleren Atmosphäre zwischen ungefähr 30 km und 100 km Höhe (bis zur *Homopause*) möglich. Dieses Verfahren wird hier nun kurz erläutert.

Für die Berechnung von Temperaturprofilen aus *Rayleigh*-Signalen kann ausgenutzt werden, dass das Rückstreusignal proportional zur Anzahldichte  $n(z) = N/V$  der Moleküle in der Atmosphäre ist (*Kent and Wright, 1970*). Unter der zusätzlichen Annahme, dass sich die Atmosphäre im hydrostatischen Gleichgewicht befindet, lässt sich dann mit der idealen Gasgleichung ( $p = nk_b T$ ) und der hydrostatischen Grundgleichung ( $dp(z) = -\rho(z)g(z) dz$ ) die Temperatur in einer bestimmten Höhe  $z$  ableiten:

$$k_b \cdot n(z) \cdot T(z) = - \int_{\infty}^z \rho(z') \cdot g(z') dz' \quad (2.2)$$

Mit  $\rho(z') = n(z') \cdot m_{air}$  ( $m_{air}$  ist die mittlere Masse eines Luftmoleküls) und durch eine stückweise Integration der rechten Seite der Gleichung ergibt sich:

$$T(z) \cdot n(z) = -\frac{m_{air}}{k_b} \left[ \int_{\infty}^{z_0} n(z') \cdot g(z') dz' + \int_{z_0}^z n(z') \cdot g(z') dz' \right] \quad (2.3)$$

Bzw.:

$$T(z) = \frac{n(z_0)}{n(z)} \cdot T(z_0) - \frac{m_{air}}{k_b} \cdot \int_{z_0}^z \frac{n(z')}{n(z)} \cdot g(z') dz' \quad (2.4)$$

Die Lidar-Messung liefert die Größen  $n(z_0)/n(z)$  und  $n(z')/n(z)$ . Man benötigt nur noch die Starttemperatur  $T(z_0)$  am oberen Ende des Messbereichs, die z.B. durch die Messung mit einem K-Lidar bestimmt werden kann. Dann wird von  $z_0$  aus integriert und man erhält das Temperaturprofil über den Messbereich des Lidars. In Abbildung 2.4 ist ein typisches Temperaturprofil aus einer Rayleigh-Lidar-Messung zu sehen (*Schöch et al., 2008*).



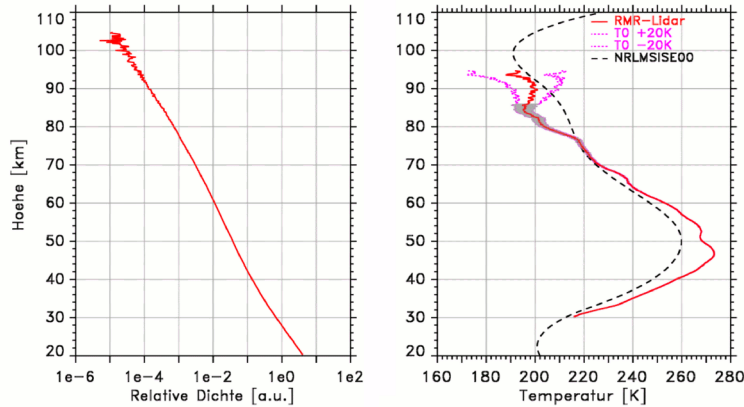


Abbildung 2.4: Beispielprofile aus einer 12-stündigen Messung des RMR-Lidars vom 13.2.2005. Links: Profil der relativen Luftdichte zwischen 20 km und 105 km. Rechts: Berechnetes Temperaturprofil zwischen 30 km und 95 km. In grau ist der statistische Fehler eingezeichnet, in violett die Verläufe des Profils bei Veränderungen der Starttemperatur  $\Delta T(z_0) = \pm 20$  K. Zum Vergleich ist ein mittleres Temperaturprofil aus der NRLMSISE00-Referenzatmosphäre abgebildet. (Quelle: *Schöch et al.*, 2008)

## 2.3 Das ALOMAR RMR-Lidar

Das RMR-Lidar ist das zentrale Lidarinstrument der Forschungsstation ALOMAR in Nord-Norwegen (69°N, 16°E) zur Erforschung der mittleren Atmosphäre in arktischen Breiten. RMR steht für *Rayleigh/Mie/Raman*, die in Abschnitt 2.2.1 beschriebenen Streuprozesse, die durch das Lidar genutzt werden können. Das Lidar wurde 1994 in einer Zusammenarbeit des IAP Kühlungsborn, der Universität Bonn, des Service d'aéronomie du Centre National de la Recherche Scientifique in Verrières-le-Buisson (Frankreich) und des University College London (Großbritannien) installiert. Seit 1995 werden mit dem Gerät ganzjährig kontinuierliche Messungen durchgeführt. Das Lidar-System wurde seit seiner Installation immer wieder durch neue Komponenten erweitert und optimiert und ist dadurch in der Lage viele Atmosphärenparameter wie Dichte, Temperatur, Wind, Aerosole etc. gleichzeitig zu messen. Außerdem ist das System fast komplett automatisiert und kann von einer einzigen geschulten Person betrieben werden. Der schematische Aufbau des ALOMAR RMR-Lidars ist in Abbildung 2.5 zu sehen.

Das RMR-Lidar ist ein Doppel-Lidar-System, das heißt, es wird mit zwei identischen Leistungslasern gleichzeitig betrieben. Die Laser werden beide von dem gleichen externen Seeder-Laser gepumpt, einem cw<sup>2</sup> Nd:YAG-Laser, der durch eine Jod-Absorptionszelle mit einer relativen Abweichung von  $\Delta\lambda/\lambda = 10^{-9}$  spektral stabilisiert wird. Sie werden abwechselnd mit einer Frequenz von 30,0 Hz getriggert und senden Pulse mit einer zeitlichen Länge von 10 ns aus. Auch die Leistungslaser sind Nd:YAG-Festkörperlaser. Sie senden Licht der Grundwellenlänge 1064 nm im infraroten Bereich, sowie der ersten Harmonischen (532 nm) im sichtbaren, grünen

<sup>2</sup>continuous wave

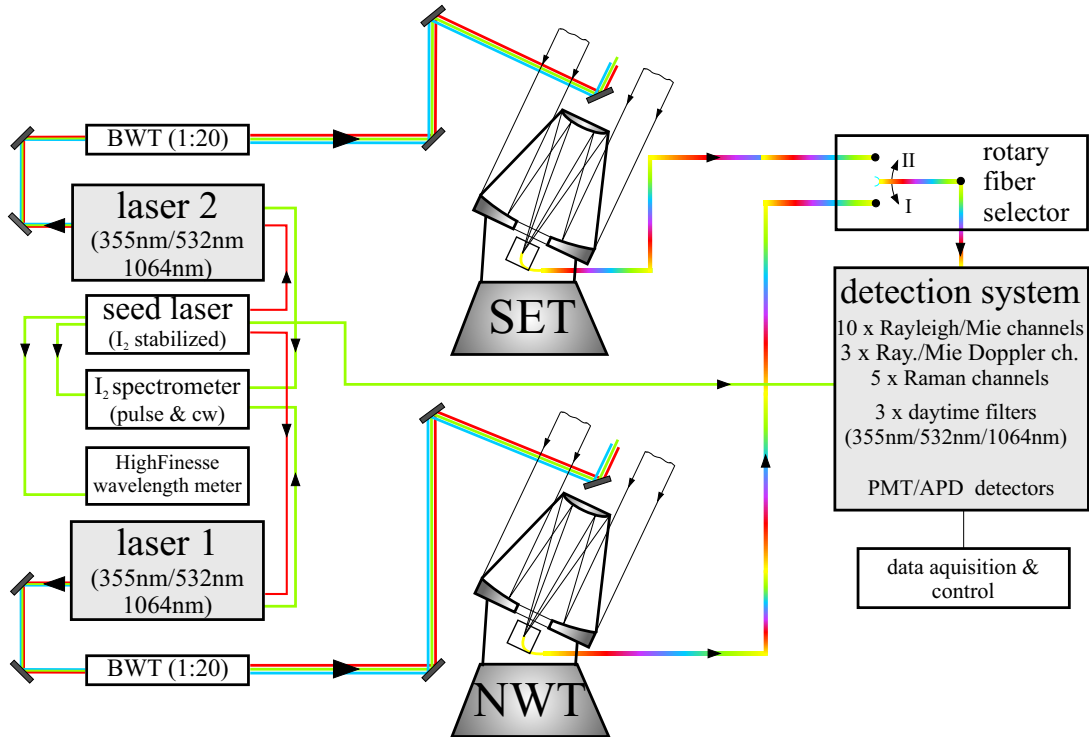


Abbildung 2.5: Schematischer Aufbau des ALOMAR RMR-Lidars. Auf der linken Seite befindet sich der spektral stabilisierte Seeder-Laser, der die beiden Leistungslaser (*laser 1*, *laser 2*) pumpt. Das von den Lasern ausgesendete Licht (355 nm, 532 nm, 1064 nm) wird aufgeweitet und über mehrere Spiegel koaxial zur optischen Achse der Teleskope in die Atmosphäre geleitet. Die beiden Teleskope fokussieren das zurückgestreute Licht auf eine Glasfaser. Der *fiber selector* sorgt für eine abwechselnde Einkopplung der beiden Signale in den gemeinsamen Nachweiszweig. Dort wird das Licht auf verschiedene Nachweiskanäle geleitet, registriert und über eine Software ausgewertet. Das gesamte System wird von einem Kontrollraum aus über mehrere Computer gesteuert. (Quelle: Baumgarten, 2010)

Bereich und der zweiten Harmonischen (355 nm) im UV-Bereich aus. Über ein Spiegelsystem, das durch Piezo-Elemente gesteuert wird, werden die Strahlen mit einer Richtungsstabilität von 1  $\mu$ rad zu einem Aufweitungssystem geleitet. Dort werden sie von 9 mm auf einen Durchmesser von 20 cm aufgeweitet. Das führt zu einer Strahldivergenz, die kleiner als 100  $\mu$ rad ist.

Aus dem Laserraum gelangen die Strahlen in die Teleskophalle in der Mitte des Observatoriums. Sie hat eine Grundfläche von 7 m x 7 m und ist 7,2 m hoch. Für Messungen lässt sich das Dach der Halle automatisch öffnen und schließen. Das ALOMAR RMR-Lidar besitzt zwei Teleskope, das *south-east telescope*, *SET* und das *north-west telescope*, *NWT*. Sie können unabhängig voneinander um einen Winkel von 30° aus der Zenit-Position gekippt und um einen Azimut-Winkel von 90° gedreht werden. Das SET deckt dadurch den Süd-Ost-Quadranten ab und das NWT entsprechend den Nord-West-Quadranten. Damit ist es unter anderem möglich, horizontale Windgeschwindigkeiten zu messen. Die Laserstrahlen werden in der Halle jeweils über drei sogenannte *beam guiding mirrors* (*BGM*) koaxial zur optischen Ach-

se der Teleskope in die Atmosphäre geleitet (Abbildung 2.6). Die Teleskope fangen dann mit ihren Primärspiegeln das zurückgestreute Licht ein und fokussieren es auf das Ende einer Glasfaser in der Fokalbox unterhalb des Primärspiegels. Genauere Beschreibungen der beiden Teleskope und der Fokalbox folgen in den Abschnitten 2.3.1 und 2.3.2.

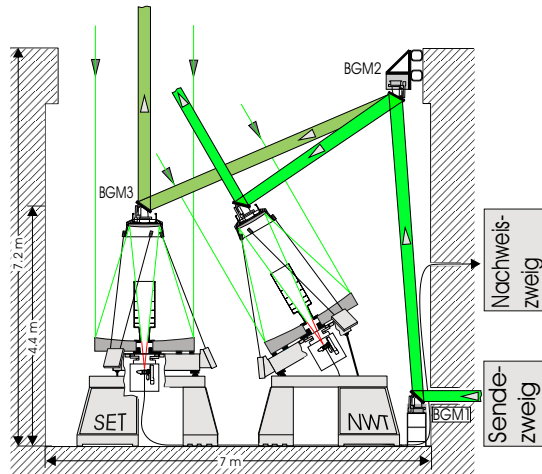


Abbildung 2.6: Teleskophalle mit den beiden Empfangsteleskopen (NWT, SET). Der aufgeweitete Strahl kommt aus dem Laserraum durch ein Loch in der Wand in die Teleskophalle. Dort wird er mit Hilfe eines *BGM* zunächst nach oben abgelenkt und von einem weiteren auf die Spitze der Teleskopkonstruktion gelenkt. Der *BGM3* wird dann so geneigt, dass der Strahl coaxial zur optischen Achse des Teleskops in die Atmosphäre geleitet wird. (Quelle: Baumgarten, 2001)

Über die Glasfaserkabel wird das Lidar-Signal aus der Teleskophalle in einen weiteren Raum zur optischen Nachweisbank geleitet. Da für beide Signale die gleiche Nachweisbank verwendet wird, müssen diese durch einen rotierenden Spiegel (*fibres selector*) abwechselnd eingekoppelt werden. Außerdem wird durch einen *chopper* das starke Signal aus niedrigen Höhen (*Troposphäre*) abgeblockt. Das Licht wird dann mit Hilfe von Strahlteilern in die verschiedenen spektralen Komponenten und abhängig von der Intensität aufgetrennt und auf die einzelnen Nachweiskanäle aufgeteilt. Insgesamt gibt es auf der optischen Bank des ALOMAR RMR-Lidars 18 Kanäle: zehn davon untersuchen das *Rayleigh*- und das *Mie*-Signal der Wellenlängen 1064 nm, 532 nm und 355 nm. Zwei weitere untersuchen das *Vibrations-Raman*-Signal bei 608 nm, angeregt durch die Wellenlänge 532 nm, ein Kanal das *Vibrations-Raman*-Signal bei 387 nm, angeregt durch 355 nm und zwei Kanäle das *Rotations-Raman*-Signal bei 529,1 nm und 530,4 nm, jeweils angeregt durch 532 nm. Außerdem dienen drei weitere Kanäle zur Windmessung anhand des optischen Dopplereffektes. Zur Registrierung der Signale werden Photomultiplier und Lawinen-Photodioden als Detektoren verwendet, die einzelne Photonen registrieren können und das Lichtsignal in ein elektrisches Signal umwandeln, das an die Computer der Datenverarbeitung weitergeleitet wird. Die Messdaten werden automatisch durch eine Software ausgewertet und per Internet zum IAP nach Kühlungsborn übertragen. Um auch am Tag, bei einer starken Hintergrundstrahlung messen zu können, wurden auf der optischen Bank zusätzlich mehrere *Einzel*- und *Doppel-Fabry-Perot-Etalons* installiert, die das Licht mit einer spektralen Bandbreite von wenigen pm filtern. Das gesamte System wird aus einem Kontrollraum über mehrere Computer gesteuert und überwacht. Eine detailliertere Beschreibung des ALOMAR RMR-Lidars ist bei von Zahn et al. (2000) zu finden.

### 2.3.1 Die Teleskope

Die Teleskophalle wurde beim Bau von ALOMAR auf einem separaten, vom Rest des Gebäudes unabhängigen Fundament, das direkt auf dem Felsen unter dem Observatorium liegt, errichtet. Beide Teleskope des RMR-Lidars sind sogenannte *Ritchey-Chrétien-Cassegrain-Teleskope* mit einem sphärischen Primär- und einem asphärischen Sekundärspiegel. Sie sind mit Sockel insgesamt ungefähr 4,5 m hoch. Der Primärspiegel hat einen Durchmesser von 1,8 m und ist aus einer Glaskeramik (*Astrosital*). Er wird außerhalb des Messbetriebs von sechs ferngesteuerten Abdecksegmenten geschützt. Darüber ist in einem Abstand von 2 m der Sekundärspiegel mit 0,6 m Durchmesser aus Aluminium befestigt. Er wird von sechs in einer Hexapod-Struktur angeordneten Aluminiumstreben getragen und verdeckt ungefähr 10% der Primärspiegelfläche. Ein großer Teil der Konstruktion wurde aus der gleichen Aluminium-Legierung gefertigt, um unterschiedliche Wärmeausdehnungen der einzelnen Komponenten der optischen Konstruktion zu verhindern. Oberhalb des Sekundärspiegels befindet sich der BGM3, der das Licht des Lasers koaxial zur optischen Achse des Teleskops in die Atmosphäre leitet. Alle BGMs sind motorisiert und können mit einer Genauigkeit von ca. 1  $\mu$ rad Abweichung positioniert werden. Wegen der großen Masse des Sekundärspiegels und seiner Befestigung (ca. 100 kg) kommt es beim Kippen des Teleskops zu einer Verschiebung der Optik. Das wird durch ein Verkippen der Befestigung des Sekundärspiegels kompensiert, so dass der Fokuspunkt an der gleichen Stelle bleibt. Die gesamte Optik besitzt eine Brennweite von 8345 mm und fokussiert das eingefangene Licht auf das Ende einer Glasfaser mit einem Durchmesser von 0,8 mm, die sich etwa 0,5 m unterhalb des Vertex des Primärspiegels in der Fokalbox befindet. Der Durchmesser der Glasfaser bestimmt zusammen mit der Brennweite das FOV des Teleskops:  $0,8/8345 = 96 \mu\text{rad}$ . Durch das kleine FOV erhält man eine sehr hohe räumliche Auflösung und kann so bei Tagmessungen den Einfluss von Hintergrundstrahlung minimieren. Das erfordert gleichzeitig aber auch eine sehr genaue Strahlstabilisierung, damit das beleuchtete Volumen während der Messung nicht aus dem FOV verschwindet. Aufgrund der großen Brennweite befindet sich der untere Teil des Messbereichs bei Lidars noch im Nahfeld des Teleskops und kann nicht, wie in der Astronomie möglich, als unendlich entfernt angenommen werden. Das führt zu Abbildungsfehlern und Defokussierung des Signals aus diesen Höhen. Eine Korrektur ist bei laufenden Messungen nicht zu erreichen, da der zeitliche Abstand zwischen den Signalen aus verschiedenen Höhen im  $\mu\text{s}$ -Bereich liegt. Deshalb wählt man die Position der Glasfaser so, dass das Signal vom unteren Ende des Messbereichs gleich stark defokussiert ist, wie das vom oberen Ende. Der Messbereich des ALOMAR RMR-Lidars liegt ungefähr zwischen 10 km und 100 km. In diesem Bereich hat man bei idealer koaxialer Strahlposition und richtiger Fokussierung einen maximalen Überlapp. Der Einfluss der Strahldivergenz und der Position der Glasfaser auf den Überlapp, vor allem in geringen Höhen, wurde von *Baumgarten* (2001) untersucht.

### 2.3.2 Die Fokalbox

Die Fokalbox befindet sich, wie bereits erwähnt, unterhalb des Primärspiegels und ist an dessen Fassung befestigt. Ihr Aufbau ist in Abbildung 2.7 gezeigt. Sie kann in  $x$ - und  $y$ -Richtung sowie bezüglich des Winkels der optischen Achse gegenüber dem Teleskop justiert werden und so fixiert werden, dass die optische Achse koaxial zu der des Teleskops liegt. Die gesamte Fokaloptik ist auf einer  $z$ -Linearverfahreinheit befestigt und lässt sich über einen Motor entlang der optischen Achse bewegen, wodurch der Fokus des Systems geändert werden kann. Dabei entsprechen 1000 Schritte des Motors 1 mm Verschiebung. Innerhalb der Box befinden sich drei optische Zweige: der RMR-Zweig, der Na-Zweig und der CCD-Zweig.

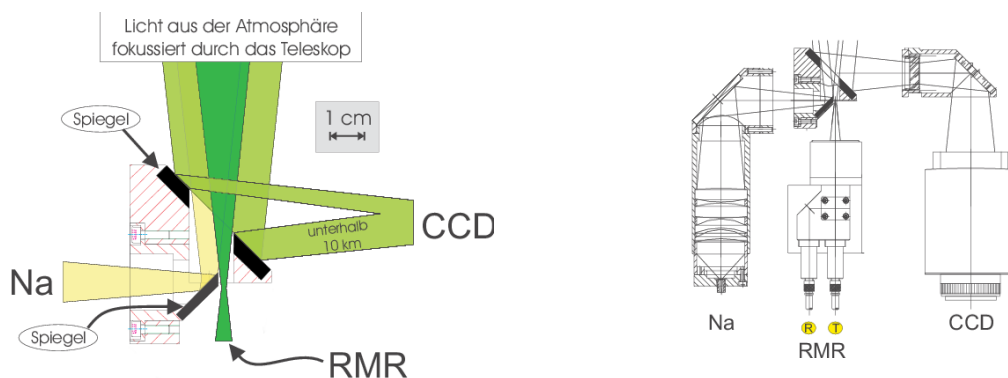


Abbildung 2.7: Aufbau der Fokaloptik. Links: Durch die beiden verkippten Spiegel wird das Licht auf die drei Zweige aufgeteilt. Das Licht aus Höhen unterhalb von 10 km wird durch den oberen Spiegel in den CCD-Zweig geleitet. Der untere Spiegel leitet Licht aus Höhen zwischen 90 km und 110 km in den Na-Zweig. Das restliche Licht gelangt in den RMR-Zweig. Rechts: Kompletter Aufbau der drei Zweige. Beim RMR-Zweig ist der zusätzlich einsetzbare Polarisator abgebildet. Die gesamte Optik lässt sich entlang der optischen Achse in  $z$ -Richtung verschieben. (Quelle: Baumgarten, 2001)

Über einen um  $45^\circ$  verkippten, planen Spiegel wird ein zweites Gesichtsfeld für Licht aus Höhen zwischen 90 km und 110 km realisiert, das durch ein optisches System in den Na-Nachweiskanal geleitet wird. Dort wird es auf *Resonanz-Streuung* an Natrium-Atomen in der oberen *Mesosphäre* untersucht. Die optische Achse des Na-Zweigs liegt 5 mm verschoben, biaxial zu der des RMR-Zweigs.

Vor dem Spiegel für den Na-Zweig befindet sich noch ein weiterer planer Spiegel, der ebenfalls um  $45^\circ$ , jedoch in die andere Richtung verkippt ist und in der Mitte ein Loch hat, durch welches das Licht für den RMR- und den Na-Zweig gelangt. Licht, das unterhalb von ca. 10 km gestreut wurde, wird durch den Spiegel auf einen 2-dimensionalen CCD-Sensor geleitet. Dieser dient zur aktiven Stabilisierung des Laserstrahls während der Messung. Für jeden Puls wird eine Intensitätsverteilung des Lichts aufgenommen, die mit einem Soll-Wert verglichen wird. Über eine Regelschleife wird dann die nötige Korrektur der Strahlrichtung an den BGM3 übergeben. Dadurch wird eine mittlere Abweichung der Strahlrichtung von weniger als  $10 \mu\text{rad}$  erreicht (Schöch and Baumgarten, 2003). Eine solche Stabilität ermöglicht Messungen mit einem kleinen FOV.

Das restliche Licht, das nicht durch die beiden Spiegel umgelenkt wird, gelangt in den RMR-Zweig. Dort wird es, wie bereits beschrieben, in eine Glasfaser eingekoppelt und zur Nachweisbank geleitet. Zusätzlich dazu kann nach Bedarf ein linearer Polarisator in den Strahlengang gefahren werden. Er ist um  $110^\circ$  rotierbar und teilt das Licht in zwei orthogonal zueinander polarisierte Komponenten auf, die jeweils in eine Glasfaser eingekoppelt werden. 2013 wurde die Fokalbox modifiziert, wodurch sich die Glasfaser des RMR-Zweigs herausnehmen lässt, um diese zu reinigen oder auszutauschen.

# Kapitel 3

## Datenanalyse, Berechnung, Auswertung

### 3.1 Untersuchungen zum Autofokus des ALOMAR RMR-Lidars

Während einer Lidar-Messung über mehrere Stunden und unter Umständen sogar Tage sind die Teleskope teils großen Schwankungen der Umgebungstemperatur ausgesetzt. Zusätzlich werden sie im Sommer in den Mittagsstunden direkt von der Sonne angestrahlt. Das führt jeweils zu einer Erwärmung bzw. Abkühlung der Teleskopstruktur. Wie zuvor bereits beschrieben, wird oft ein großer Teil der Konstruktion aus dem gleichen Material angefertigt. Dadurch kommt es zwar zu einer gleichmäßigen relativen Verformung der Struktur, trotzdem dehnt sie sich bei einer Erwärmung aus und zieht sich bei einer Abkühlung zusammen. Diese thermische Längenänderung hat eine Änderung des Abstandes zwischen Primär- und Sekundärspiegel und letztendlich eine Verschiebung des Fokus entlang der optischen Achse des Teleskops zur Folge. Die Signalverluste aufgrund eines unvollständigen Überlapps durch eine solche Defokussierung machen sich vor allem im unteren Messbereich stark bemerkbar. Bei einem Lidar-System, das zu allen Jahreszeiten Messungen über viele Stunden vornimmt, muss dieser Effekt durch eine aktive Fokuskorrektur kompensiert werden.

In das ALOMAR RMR-Lidar wurde im Sommer 2007 ein Autofokus-System integriert, das Verschiebungen des Fokus durch thermische Längenänderungen der Teleskopstruktur korrigieren soll. Dafür wurde zuvor bei beiden Teleskopen in einem Zeitraum von über einem Jahr für mehrere verschiedene Temperaturen jeweils die Position der Glasfaser entlang der optischen Achse gesucht, für die das Signal optimal ist. Zur Bestimmung der Temperaturen wurden an einigen Punkten der Teleskope und in der Teleskophalle Temperatursensoren angebracht. Die aus den Untersuchungen resultierten Kennlinien der optimierten Faserposition in Abhängigkeit von der Temperatur sind in Abbildung 3.1 zu sehen. Aus den Kennlinien konnte

### 3.1 Untersuchungen zum Autofokus des ALOMAR RMR-Lidars

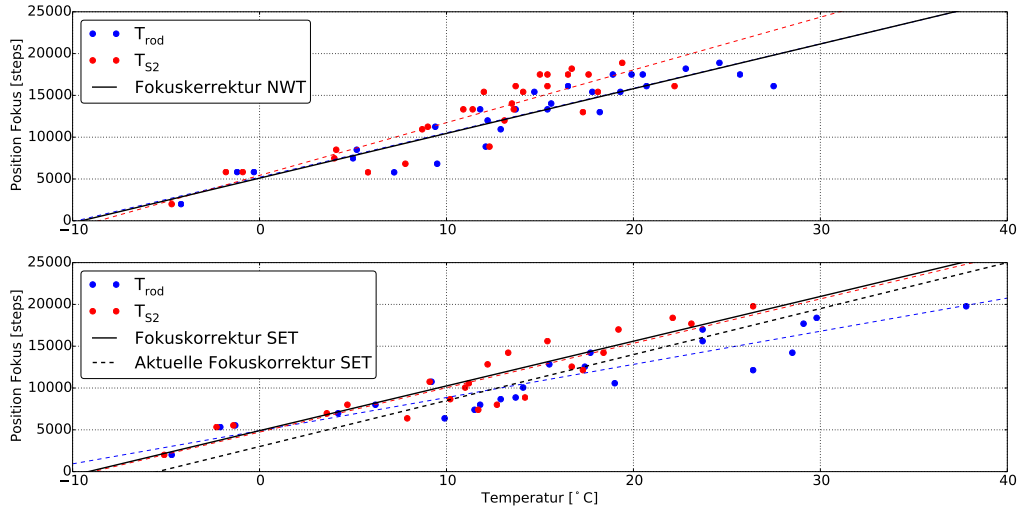


Abbildung 3.1: Optimierte Fokuspositionen für verschiedene Temperaturen  $T_{rod}$  und  $T_{S2}$ . Die schwarzen Geraden zeigen die daraus abgeleiteten Korrekturfunktionen für den Autofokus (NWT:  $5100 + 535 \cdot T$  mit  $T = 0,5 \cdot T_{rod} + 0,5 \cdot T_{S2}$ , SET:  $4900 + 535 \cdot T$  mit  $T = 0,33 \cdot T_{rod} + 0,66 \cdot T_{S2}$ ) Die gestrichelte schwarze Gerade im unteren Graphen zeigt die aktuelle Korrekturfunktion für das SET, da diese von der ursprünglichen abweicht. Zum Vergleich wurde zusätzlich als gestrichelte rote und blaue Gerade ein linearer Fit durch die Datenpunkte gelegt (blau:  $T_{rod}$ , rot:  $T_{S2}$ ).

dann für jedes Teleskop eine Funktion zur idealen Positionierung der Faser abgeleitet werden. Das installierte Autofokussystem passt seitdem während einer Messung anhand dieser Funktion und der aktuellen Teleskoptemperatur alle 20 Minuten die  $z$ -Position der Glasfaser an. Die Verschiebung geschieht über den in Abschnitt 2.3.2 beschriebenen Motor in der Fokalbox.

Seit 2007 wurden die Korrekturfunktionen teilweise leicht geändert. Von den insgesamt vier Temperatursensoren an jedem Teleskop werden nur jeweils zwei zur Bestimmung der Teleskoptemperatur verwendet, um nur die Temperaturänderungen der relevanten Bauteile zu registrieren. Aus den beiden Temperaturen wird eine mittlere Temperatur  $T_{mean}$  berechnet, anhand derer die ideale Position des Fokus bestimmt wird. Aktuell sehen die Funktionen seit dem 30.5.2013 wie folgt aus:

NWT:

$$pos_{focus} = T_{mean} \cdot 535 \text{ steps/K} + 5100 \text{ steps} \quad (3.1)$$

mit  $T_{mean} = (T_{S2} + T_{rod})/2$  in  $^{\circ}\text{C}$  und  $pos_{focus}$  in Motorschritten ( $1000 \text{ steps} \hat{=} 1 \text{ mm}$ ).

SET:

$$pos_{focus} = T_{mean} \cdot 550 \text{ steps/K} + 3000 \text{ steps} \quad (3.2)$$

mit  $T_{mean} = (2 \cdot T_{S2} + T_{rod})/3$  in  $^{\circ}\text{C}$  und  $pos_{focus}$  in Motorschritten (steps).



Der Sensor für  $T_{rod}$  ist an einer der sechs Stangen der Hexapod-Struktur befestigt, der Sensor für  $T_{S2}$  an der Halterung des Sekundärspiegels, die durch die Stangen getragen wird und in der der Spiegel befestigt ist. Die thermische Längenänderung dieser beiden Elemente, der Stangen und der Halterung, ist maßgeblich verantwortlich für eine Verschiebung des Abstandes der beiden Spiegel und somit eine Fokusverschiebung. Bei der Bestimmung der mittleren Temperatur für die Korrekturformel des SET wurde  $T_{S2}$  doppelt gewichtet, da der Sensor an der Stange in den Mittagsstunden teilweise direkt von der Sonne getroffen wird und deshalb eine zu hohe Temperatur anzeigt.

An den Funktionen ist zu erkennen, dass die Glasfaser bei einer Temperaturänderung von 1 K um 550 steps bzw. 535 steps, also 0,55 mm bzw. 0,535 mm entlang der optischen Achse verschoben wird. Im Laufe einer langen Messung sind Temperaturdifferenzen von mehr als 10 K durchaus möglich. Das bedeutet Korrekturen um mehrere mm und in Extremfällen sogar im cm-Bereich.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden einige Untersuchungen zum Autofokus des ALOMAR RMR-Lidars anhand von Systemdaten vorgenommen um darzustellen, wie das System arbeitet. Hierfür standen die gesamten Lidar-Daten des Jahres 2013, sowie des Frühjahres 2014 (Januar bis März) zur Verfügung. Außerdem wurden zusätzliche Systemdaten des Autofokus und der Temperatursensoren verwendet. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Dateien und deren Inhalt.

|                         |                                                                                                                         |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b><i>Level1a</i></b>   | Lidar-Rohdaten:<br>Untergrund abgezogen, Totzeit- und Transmissionskorrektur durchgeführt                               |
|                         | Systemdaten (Fokusposition, $T_{rod}$ , $T_{S2}$ , $T_{mean}$ ):<br>alle 5 min während der Messung                      |
| <b><i>tempsens</i></b>  | Temperaturen (alle Sensoren):<br>alle 10 sec während der Messung                                                        |
| <b><i>autofocus</i></b> | Temperaturen ( $T_{rod}$ , $T_{S2}$ , $T_{mean}$ ):<br>gemittelt über 10 min aus <i>tempsens</i>                        |
|                         | alle 20 min durchgehend (10, 30, 50 min nach voller Stunde)                                                             |
|                         | Fokusposition:<br>aus gemittelten Temperaturen berechnet<br>alle 20 min durchgehend (10, 30, 50 min nach voller Stunde) |

#### 3.1.1 Erwärmung der Stangen durch Sonneneinstrahlung

Zunächst wird gezeigt, wie sich die Temperatur des Teleskops und gleichzeitig der Autofokus im Laufe einer längeren Messung verhält. Dazu wird eine 42-stündige Messung, beginnend am 5.6.2013 betrachtet. In Abbildung 3.2 ist für beide Teleskope der Verlauf der Temperaturen  $T_{S2}$  und  $T_{rod}$  und der Verlauf der Fokusposition

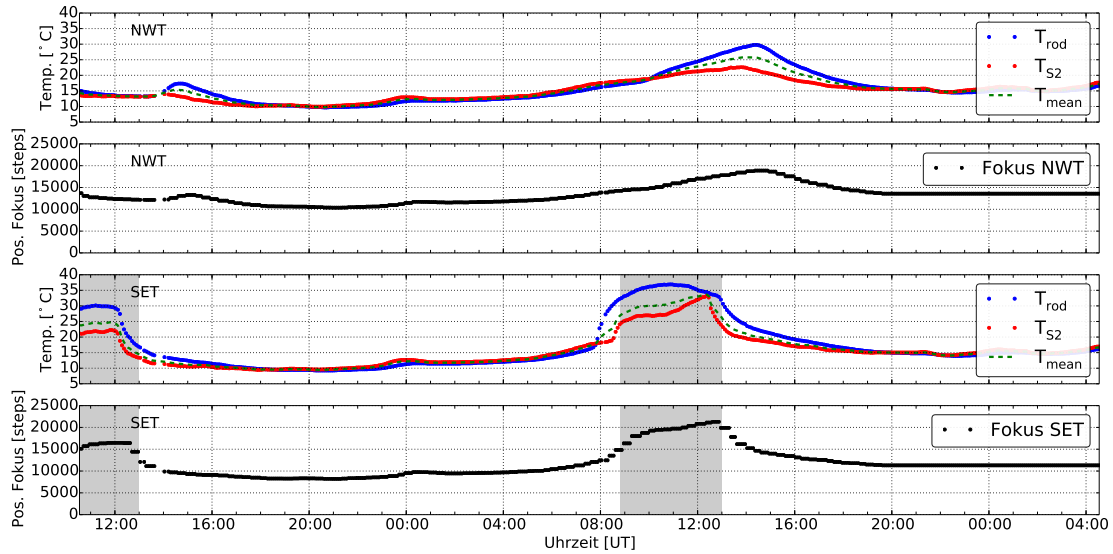


Abbildung 3.2: Verlauf der Temperaturen und der Fokusposition während einer 42-stündigen Messung am 5.6.2013. Zwischen 8 Uhr und 13 Uhr ist  $T_{rod}$  beim SET durch direkte Sonnenbestrahlung wesentlich höher als  $T_{S2}$ .  $T_{mean}$  folgt dieser Temperaturerhöhung jedoch kaum, da  $T_{S2}$  doppelt gewichtet wird. Beim NWT weicht  $T_{rod}$  erst einige Stunden später nach oben hin ab. Am Verlauf von  $T_{mean}$  ist zu erkennen, dass hier beide Temperaturen gleich stark gewichtet werden. Der Fokus des SET wird im Laufe der Messung um fast 15000 steps bzw. 1,5 cm verschoben.

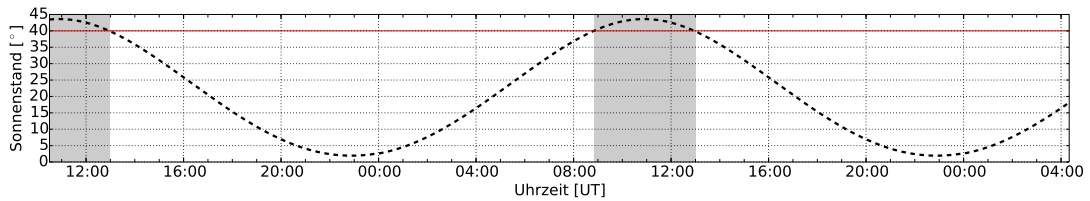


Abbildung 3.3: Verlauf des Sonnenstandes während der 42-stündigen Messung am 5.6.2013. Zusätzlich wurde in rot eine Gerade bei einem Sonnenstand von  $40^\circ$  eingezeichnet. In den Zeiten, in denen der Sonnenstand über der roten Gerade liegt, wird das SET direkt von der Sonne angestrahlt.

über den Zeitraum dieser Messung dargestellt (*Level1a*-Daten).

Innerhalb der 42 Stunden variiert die Temperatur zwischen  $10^\circ\text{C}$  in der Nacht und über  $30^\circ\text{C}$  beim SET in den Mittagsstunden. Der Fokus wird dadurch um mehr als 10000 steps bzw. 1 cm verschoben. An diesem Beispiel ist gut zu erkennen, warum beim SET die Temperatur  $T_{S2}$  doppelt gewichtet wird. Zwischen ungefähr 8 Uhr und 12 Uhr zeigt der Sensor an der Stange eine signifikant höhere Temperatur an, als der, der an der Halterung des Sekundärspiegels angebracht ist. Er wird in dieser Zeit direkt von der Sonne angestrahlt. Durch die doppelte Gewichtung von  $T_{S2}$  folgt der Autofokus dieser Temperaturerhöhung jedoch nur in verringertem Maße. Das SET befindet sich in der Nord-West-Ecke der Teleskophalle ca. 2 m von den Wänden entfernt. Der Sensor für  $T_{rod}$  befindet sich in 3,1 m Höhe. Aus den Abmessungen der Halle lässt sich berechnen, dass dieser Sensor ab einem Sonnenstand von

knapp  $40^\circ$  über dem Horizont direkt angestrahlt werden kann. Am 5.6. ist das laut dem Astronomieprogramm *XEphem* für ALOMAR ( $69, 0^\circ\text{N}$ ,  $16, 3^\circ\text{E}$ ) zwischen 9 Uhr und 13 Uhr der Fall (Abbildung 3.3). Wenn die Sonne am Anfang dieses Zeitraumes aus Süd-Ost-Richtung scheint, steht das SET direkt in der Sonne. Das erklärt die starke Erhöhung von  $T_{rod}$  in diesem Zeitraum. Durch seine Position in der Süd-Ost-Ecke der Halle, kann das NWT erst ab den späten Mittagsstunden von der Sonne getroffen werden. In Abbildung 3.2 ist dies durch den verspäteten Temperaturanstieg beim NWT zu erkennen. In diesem Zeitraum ist ebenfalls  $T_{rod}$  wesentlich höher als  $T_{S2}$ . Die beiden Temperaturen werden beim NWT gleich stark gewichtet, wodurch sich  $T_{mean}$  genau zwischen den beiden befindet. Die sehr viel stärkere Erhöhung von  $T_{rod}$  in einem Zeitraum, in dem direkte Sonnenbestrahlung möglich ist, spricht dafür, dass es sinnvoll wäre, auch hier  $T_{S2}$  bei der Berechnung der mittleren Temperatur doppelt zu gewichten.

#### 3.1.2 Grenzen des Autofokus

Der Motor in der Fokalbox, der die Glasfaser in  $z$ -Richtung verschiebt, besitzt eine maximale Reichweite von 25000 steps. Anhand der Gleichungen 3.1 und 3.2 kann damit berechnet werden, bei welcher Temperatur der Motor an seine obere, bzw. untere Grenze stößt. Für das NWT wird die obere Grenze bei einer Temperatur von  $37,20^\circ\text{C}$  erreicht. Die kleinste, mögliche Temperatur, für die der Autofokus das NWT noch fokussieren kann, liegt bei  $-9,53^\circ\text{C}$ . Beim SET ergibt sich eine höchste Temperatur von  $40,00^\circ\text{C}$  und eine niedrigste von  $-5,45^\circ\text{C}$ .

Die oberen Begrenzungen stellen kein Problem dar. Selbst bei direkter Sonnenbestrahlung im Sommer erreicht die mittlere Temperatur des SET keine solch hohen Werte. Bei der im vorigen Abschnitt betrachteten Messung vom 5.6.2013 bleiben die Werte von  $T_{mean}$  auch in den Mittagsstunden unter  $35^\circ\text{C}$ . Die untere Grenztemperatur kann bei Messungen im Winter jedoch durchaus erreicht werden. Als Beispiel für einen solchen Fall ist in Abbildung 3.4 der Temperaturverlauf und der Verlauf der Fokusposition während einer 50-stündigen Messung vom 10.1.2014 dargestellt (*Level1a*-Daten). Die mittlere Temperatur des NWT bewegt sich über die meiste Zeit in einem Bereich um  $-8^\circ\text{C}$ . Das liegt noch knapp über der minimalen Temperatur ( $-9,53^\circ\text{C}$ ). Auch beim SET fällt die mittlere Temperatur zu Beginn der Messung direkt auf  $-8^\circ\text{C}$  bis  $-9^\circ\text{C}$  und bleibt für den größten Teil der Messung auf diesem Niveau. Hier befinden sich diese Werte hingegen deutlich unterhalb der Minimaltemperatur ( $-5,45^\circ\text{C}$ ). Gegen Ende der Messung steigt die Temperatur wieder leicht an, jedoch nicht auf Werte, die über der Minimaltemperatur liegen. Das bedeutet, dass sich die Fokusposition während fast der kompletten Messung über ca. 50 Stunden an der unteren Grenze befindet und somit keine Fokuskorrektur vorgenommen wird. Solche Temperaturen sind in den Wintermonaten durchaus normal, weshalb es in diesen Zeiten vor allem beim SET häufig dazu kommen kann, dass der Motor des Autofokus an die untere Grenze seiner Reichweite stößt. Im Januar 2014 kam das ALOMAR RMR-Lidar durch gute Wetterbedingungen auf insgesamt über 250

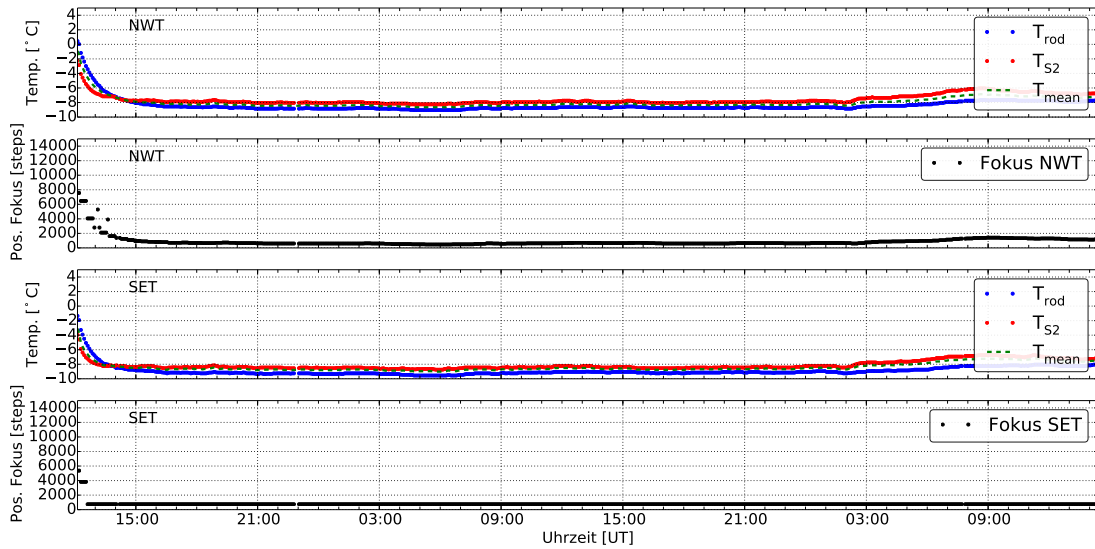


Abbildung 3.4: Verlauf der Temperaturen und der Fokusposition während einer 50-stündigen Messung am 10.1.2014. Die Temperaturen sinken bei beiden Teleskopen in den ersten Stunden der Messung auf weniger als  $-8^{\circ}\text{C}$ . Beim NWT wird die Grenze aufgrund der anderen Justierung des Sekundärspiegelabstandes nicht erreicht. Die untere Grenze des Autofokusbereichs des SET ist bereits nach ca. einer Stunde erreicht. Bis zum Ende der Messung findet dadurch keine Fokuskorrektur beim SET statt.

Messstunden. Bei einer solchen Datenmenge ist es ungünstig, wenn es durch eine unvollständige Fokuskorrektur zu Qualitätsverlusten bei den Daten kommt. Da die obere Grenze der Reichweite des Motors nicht erreicht wird, wäre es möglich den kompletten Motor in der Fokalbox entlang der optischen Achse zu verschieben, so dass sich der Bereich in Richtung niedrigerer Temperaturen verschiebt und im Winter nicht so schnell die untere Grenze erreicht wird.

#### 3.1.3 Verzögerung der Fokuskorrektur

Die hohe Wärmeleitfähigkeit der Aluminiumlegierung, aus der die Teleskopstruktur besteht, sorgt dafür, dass sich Temperaturschwankungen sehr schnell im Material ausbreiten. Dadurch kommt es bei einer Temperaturerhöhung zu einer schnellen Ausdehnung der Struktur. Es ist daher wichtig, dass der Autofokus so direkt wie möglich auf die Temperaturänderungen reagiert und die Position des Fokus korrigiert. Um zu untersuchen, wie schnell das Autofokus-System des ALOMAR RMR-Lidars temperaturbedingte Fokusverschiebungen ausgleicht, wurde der exakte Verlauf der Temperaturen, die von den Sensoren registriert werden, mit dem Verlauf der Fokuspositionen verglichen.

Dazu wurde die Temperatur  $T_{mean}$  aus den Einträgen der *tempsens*-Datei, in der die genauen Werte der Sensoren in einem zeitlichen Abstand von 10 s abgespeichert werden, berechnet. Der dadurch erhaltene präzise Temperaturverlauf wird mit dem

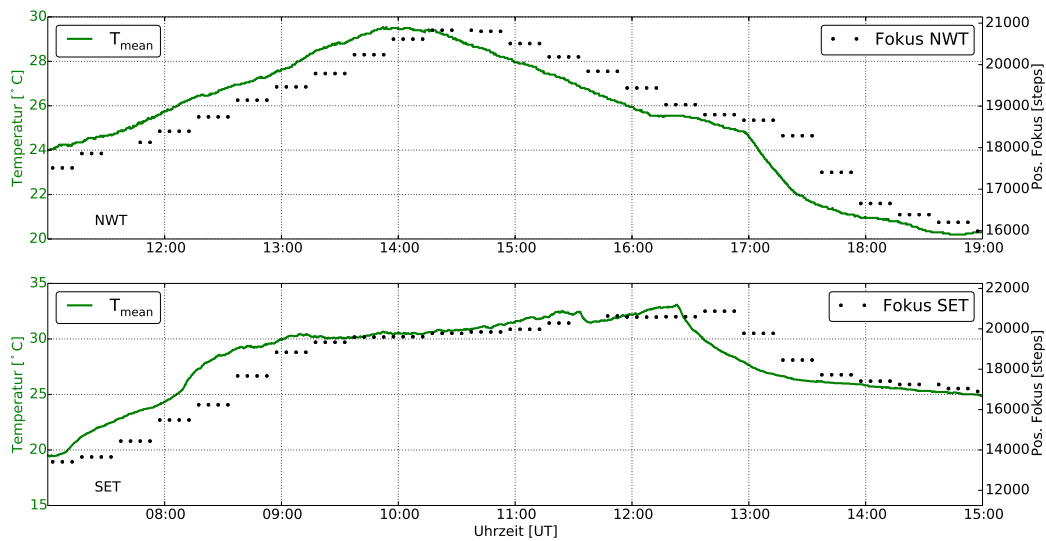


Abbildung 3.5: Verlauf der Temperatur  $T_{mean}$  und der Fokusposition während eines Ausschnittes aus einer 35-stündigen Messung am 31.5.2013 für das NWT (oben) und das SET (unten). Die grüne Kurve zeigt die Temperatur  $T_{mean}$ , die aus den Werten einer Datei berechnet wurde, in der alle 10 s die exakte, von den Sensoren gemessene Temperatur gespeichert wird. Die schwarzen Punkte sind die Fokuspositionen, die während der Messung alle 5 min registriert werden. Die  $y$ -Achsen wurden über die Autofokus-Korrekturfunktionen aneinander angeglichen. Für beide Teleskope wurde jeweils ein 8-stündiger Ausschnitt aus der Messung gewählt, in dem sowohl ein Temperaturanstieg, als auch ein Temperaturabfall in den Mittagsstunden zu sehen ist.

Verlauf der Fokusposition verglichen, der alle 5 min registriert wird (*Level1a*-Daten). Abbildung 3.5 zeigt diese beiden Graphen (grün und schwarz) für einen 8-stündigen Ausschnitt aus einer Messung vom 31.5.2013. Für jedes Teleskop wurde jeweils ein kleiner Ausschnitt aus der Messung ausgewählt, an dem sich ein Temperaturmaximum befindet. Die  $y$ -Achsen wurden über die Autofokus-Korrekturfunktionen so angeglichen.

Man sieht in der Abbildung, dass die Fokusposition der Temperatur ein gutes Stück hinterherhinkt. Außerdem werden gewisse kurzzeitige Veränderungen des Temperaturverlaufes vom Autofokus ignoriert, bzw. nicht aufgelöst, da dieser nur alle 20 min die Position der Glasfaser verändert (vgl. Abschnitt 3.1). Diese Verzögerung in der Korrektur kann unter anderem dazu führen, dass die Fokusposition aufgrund einer Erhöhung der Temperatur verschoben wird, während die Temperatur schon wieder am Sinken ist. Ein solcher Fall ist in Abbildung 3.5 sowohl beim NWT zwischen 14 Uhr und 15 Uhr, als auch beim SET zwischen 12 Uhr und 13 Uhr zu beobachten. Um diese zeitliche Verschiebung zu erklären, muss der Vorgang der Fokuskorrektur genauer betrachtet werden. Alle 20 min mittelt ein Programm des Systems für  $T_{rod}$  und  $T_{S2}$  die Werte der letzten 10 min aus der in Abbildung 3.5 verwendeten *tempsens*-Datei. Daraus wird dann mit Hilfe der Korrekturfunktionen die ideale Fokusposition berechnet und in einem Verzeichnis (*autofocus*) gespeichert. Dieser Vorgang wird immer zu den selben Zeitpunkten, jeweils 10, 30 und 50 Minuten nach

der vollen Stunde durchgeführt. Ein weiteres Programm liest alle 10 min den Wert der berechneten Fokusposition aus dem Verzeichnis aus und gibt einen Befehl an den Motor in der Fokalbox weiter, durch den die Glasfaser an die gewünschte Position verschoben wird. Die genauen Zeitpunkte, zu denen dies geschieht, variieren und hängen von der Uhrzeit beim Start der Messung ab. Während der Messung wird die Fokusposition schließlich alle 5 min registriert (schwarzer Graph, *Level1a-Daten*). Durch den beschriebenen Mechanismus kann es also zu einer zeitlichen Differenz von bis zu 30 min zwischen der gemessenen Temperatur und der Ausführung der Fokusverschiebung kommen. Bei Änderungen der Temperatur von über 5 K/h (SET: 8-9 Uhr) führt das teilweise zu groben Fehlfokussierungen.

## 3.2 Theoretische Berechnung zur Fokusverschiebung

Zur Überprüfung des Autofokus, insbesondere der verwendeten Korrekturfunktion, wurde mit einer theoretischen Berechnung die Verschiebung der Teleskopstruktur und der Position des Fokus durch thermische Längenänderung bestimmt.

Aus den technischen Zeichnungen der Teleskope können die genauen Maße der Bauteile, die für die Verschiebung des Fokus eine Rolle spielen, sowie die Legierung, aus der sie gefertigt wurden, entnommen werden. Es handelt sich um die Aluminium-Legierung *AlMgSi1*, die eine hohe Wärmeleitfähigkeit und einen Wärmeausdehnungskoeffizienten von  $\alpha = 23,4 \cdot 10^{-6}/\text{K}$  besitzt<sup>1</sup>. Der größte Teil der Verschiebung wird durch die Längenänderung der sechs Stangen, die den Sekundärspiegel tragen, verursacht. Sie sind jeweils 2108 mm lang und stehen in einem Winkel von  $\phi = 12,88^\circ$  zur optischen Achse. Dazu kommt noch ein Teil der Halterung des Sekundärspiegels mit 240 mm, parallel zu optischen Achse. Der relevante Teil der Konstruktion ist zum besseren Verständnis der folgenden Berechnungen in Abbildung 3.6 vereinfacht dargestellt.

Die Verschiebung des Abstandes der beiden Spiegel setzt sich aus der Längenänderung der Stangen entlang der optischen Achse und der Längenänderung der Spiegelhalterung zusammen:

$$\Delta \overline{S1S2} = \Delta h_{rod} + \Delta h_{mount} \quad (3.3)$$

Die thermische Längenänderung eines Körpers wird folgendermaßen berechnet:

$$\Delta l = \alpha \cdot \Delta T \cdot l \quad (3.4)$$

Die Verschiebung durch die Spiegelhalterung ist damit direkt gegeben durch:

$$\Delta h_{mount} = \alpha \cdot \Delta T \cdot h_{mount} \quad (3.5)$$

mit  $\alpha = 23,4 \cdot 10^{-6}/\text{K}$  und  $h_{mount} = 240 \text{ mm}$ . Bei der Verschiebung durch die Stangen muss beachtet werden, dass eine Längenänderung der Stange sich nicht

---

<sup>1</sup>Quelle: Technisches Datenblatt EN AW 6082

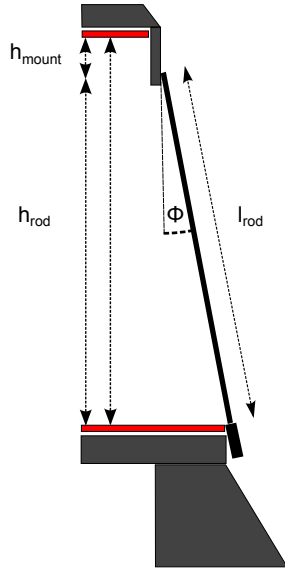


Abbildung 3.6: Schematische Skizze der Teleskopstruktur. Die für die Berechnung relevanten Teile der Konstruktion sind in den richtigen Längenverhältnissen zueinander abgebildet. Der Abstand zwischen den beiden Spiegeln (rot) setzt sich aus der Höhe  $h_{rod}$  der Stangen und der Höhe  $h_{mount}$  der Spiegelhalterung zusammen. Die Stangen haben die Länge  $l_{rod}$  und stehen im Winkel  $\phi$  zur optischen Achse.

in gleichem Maße auf den Abstand der Spiegel auswirkt, da die Stangen in einem Winkel  $\phi$  zur optischen Achse stehen. Dabei gilt:

$$\cos(\phi) = \frac{h_{rod}}{l_{rod}} = \frac{h_{rod} + \Delta h_{rod}}{l_{rod} + \Delta l_{rod}} \quad (3.6)$$

Für  $\Delta h_{rod}$  ergibt sich daraus:

$$\Delta h_{rod} = \cos(\phi) \cdot (l_{rod} + \Delta l_{rod}) - h_{rod} \quad (3.7)$$

Für  $\Delta l_{rod}$  kann Gleichung 3.4 verwendet werden:

$$\Delta h_{rod} = \cos(\phi) \cdot (l_{rod} + (\alpha \cdot \Delta T \cdot l_{rod})) - h_{rod} \quad (3.8)$$

Die Gleichungen 3.5 und 3.8 können nun wieder in Gleichung 3.3 eingesetzt werden und man erhält den vollständigen Ausdruck für die theoretische Verschiebung des Abstandes zwischen den beiden Spiegeln durch thermische Längenänderungen der Teleskopkonstruktion:

$$\overline{\Delta S1S2} = \cos(\phi) \cdot (l_{rod} + (\alpha \cdot \Delta T \cdot l_{rod})) - h_{rod} + (\alpha \cdot \Delta T \cdot h_{mount}) \quad (3.9)$$

mit  $l_{rod} = 2108 \text{ mm}$ ,  $h_{rod} = 2065 \text{ mm}$ ,  $h_{mount} = 240 \text{ mm}$ ,  $\phi = 12,88^\circ$  und  $\alpha = 23,4 \cdot 10^{-6}/\text{K}$ .

Anhand dieser Gleichung lässt sich für jede Temperaturerhöhung oder Temperaturerniedrigung die Änderung des Spiegelabstandes berechnen. Bzw. für eine Starttemperatur, bei der die Bauteile die angegebenen Maße besitzen, lässt sich der absolute Abstand der beiden Spiegel berechnen.

### 3.2 Theoretische Berechnung zur Fokusverschiebung

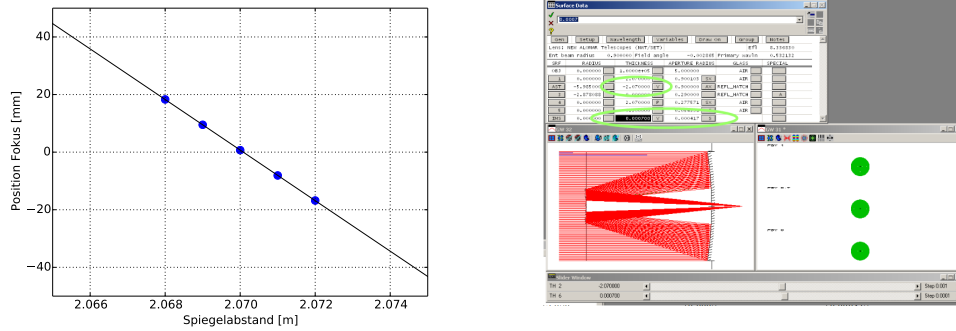


Abbildung 3.7: *Raytracing*-Simulation zur Bestimmung der optischen Verstärkung. Links: Position des Fokus für unterschiedliche Spiegelabstände. Aus der Steigung eines linearen Fits durch die Messpunkte kann die optische Verstärkung des Teleskops bestimmt werden. Rechts: Graphische Oberfläche des Simulationsprogramms. Bei vorgegebenem Spiegelabstand (obere grüne Markierung) wird die Position gesucht, an der die Apertur minimal wird (untere Markierung, rechter Wert). Dieser Punkt ist dann die Position des Fokus (untere Markierung, linker Wert). Im unteren Teil sieht man links den Verlauf der Strahlen durch die Teleskoptoptik und rechts die Apertur.

Nach dieser Berechnung vergrößert sich der Abstand bei einer Temperaturerhöhung von 1 K durch den sehr geringen Wärmeausdehnungskoeffizienten der Aluminium-Legierung nur um ungefähr 0,05 mm.

Die Änderung des Spiegelabstandes entspricht jedoch noch nicht direkt der Verschiebung der Fokusposition. Durch die spezielle Optik des Teleskops kommt es zu einer Verstärkung des Effektes. Diese optische Verstärkung kann mit Hilfe einer *raytracing*-Simulation bestimmt werden. In einem Modell, in das der genaue Aufbau und die Abmessungen des Teleskops und die exakte Spiegelformen implementiert sind, werden Strahlen simuliert, die auf das Teleskop treffen. Das Programm berechnet den Verlauf der Strahlen durch die gesamte Optik. Gibt man dem Programm einen veränderten Spiegelabstand vor, lässt sich bestimmen, um wie viel sich die Position, an der die Strahlen fokussiert werden, entlang der optischen Achse verschiebt. Die Simulation wurde für mehrere verschiedene Spiegelabstände durchgeführt und jeweils der Ort der Fokussierung ermittelt. Aus der Steigung einer Ausgleichsgeraden durch die einzelnen Punkte ergibt sich der Wert für die optische Verstärkung des Teleskops (Abbildung 3.7). Die Simulation ergab einen optischen Verstärkungsfaktor von 8,78.

Aus Gleichung 3.9 und der optischen Verstärkung erhält man schließlich eine Formel für die theoretische Verschiebung der Position des Fokus durch Änderungen der Teleskoptemperatur:

$$\Delta pos_{focus,theo} = 8,78 \cdot (\cos(\phi) \cdot (l_{rod} + (\alpha \cdot \Delta T \cdot l_{rod})) - h_{rod} + (\alpha \cdot \Delta T \cdot h_{mount})) \quad (3.10)$$

Bei einer Temperaturänderung von 1 K verschiebt sich der Fokus des Teleskops nach diesem Modell somit um ca. 0,47 mm. Für eine Verschiebung von 1 cm wäre eine Erwärmung oder Abkühlung von gut 21 K nötig. Da solch hohe Temperaturunterschiede möglich sind, wird deutlich, dass es sehr wichtig ist, beim Bau der Teleskope



ein Material wie *AlMgSi1* mit einem geringen Wärmeausdehnungskoeffizienten zu verwenden.

## 3.3 Vergleich zwischen Modell und Autofokus

In Abschnitt 3.2 wurde die durch Temperaturunterschiede bedingte Ausdehnung der Teleskopstruktur und damit die Verschiebung des Fokus entlang der optischen Achse theoretisch berechnet. Das Ergebnis dieser Berechnung wird nun mit der Korrektur des Autofokus der beiden Teleskope verglichen.

Dafür wurden die Korrekturfunktionen in Abbildung 3.8 zusammen mit der berechneten Verschiebung des Fokus dargestellt. Die rote Gerade zeigt das Ergebnis aus Formel 3.10 in Abhängigkeit von der Temperatur. Die blauen Geraden zeigen die Korrekturfunktionen der beiden Teleskope, ebenfalls über die Temperatur aufgetragen. Der Nullpunkt wurde für alle drei Geraden auf 15°C gelegt, damit sie besser verglichen werden können. Außerdem wurden die beiden  $y$ -Achsen so angeglichen, dass 1 mm auf der linken 1000 steps auf der rechten entspricht.

An der Steigung der Geraden ist zu sehen, dass der Autofokus bei beiden Teleskopen etwas stärker korrigiert, als sich der Fokus laut der Berechnung verschiebt. Beim SET ist die Steigung der Gerade mit 550 steps/K etwas größer als die des NWT mit 535 steps/K. Die Gerade der theoretischen Berechnung hat eine Steigung von 0,4736 mm/K. Das entspräche einer nötigen Korrektur der Position des Fokus

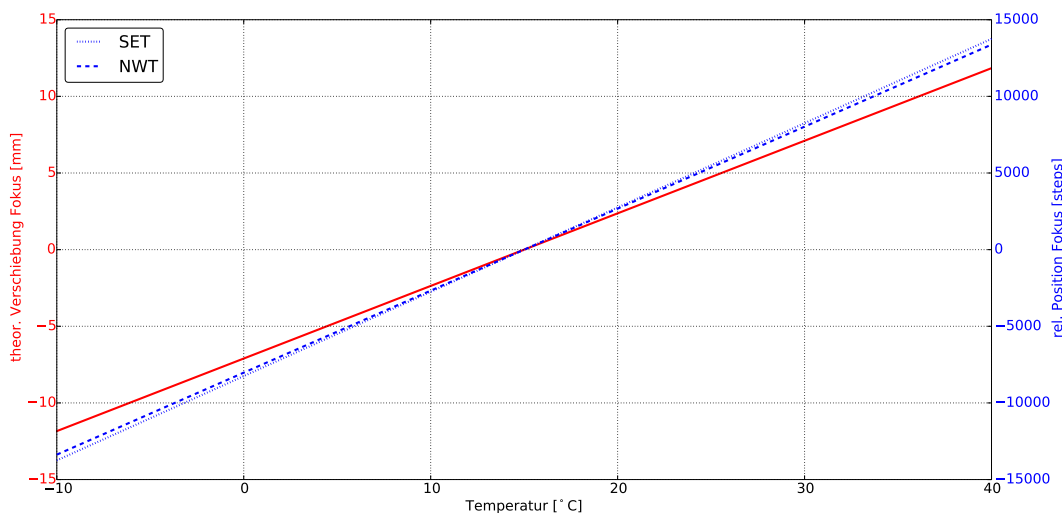


Abbildung 3.8: Vergleich zwischen der berechneten Verschiebung des Fokus und den Korrekturfunktionen der Teleskope. In rot wurde die berechnete Verschiebung über die Temperatur aufgetragen. Die beiden blauen Geraden sind die Korrekturfunktionen der Teleskope, ebenfalls über die Temperatur aufgetragen. Um die Geraden vergleichen zu können, wurde der Nullpunkt jeweils auf 15°C gelegt und 1 mm auf der linken Achse entspricht 1000 steps auf der rechten Achse.

### 3.3 Vergleich zwischen Modell und Autofokus

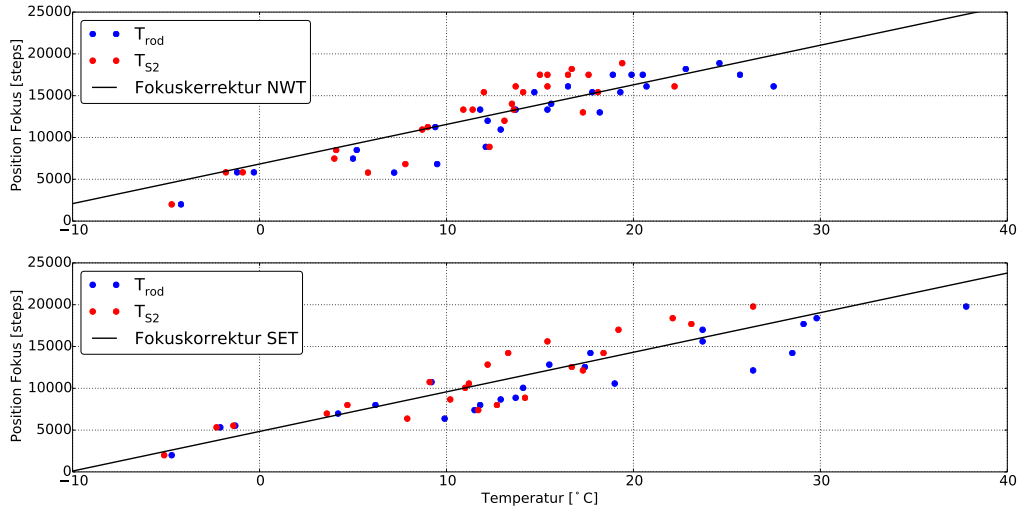


Abbildung 3.9: Ermittlung einer verbesserten Korrekturfunktion für das NWT und das SET. Die Messwerte aus den Jahren 2006 und 2007 zur Berechnung der ursprünglichen Korrekturfunktionen wurden wie in Abbildung 3.1 dargestellt. Durch die Datenpunkte wurde für beide Teleskope jeweils ein linearer Fit gelegt, bei dem die Steigung auf den bereits berechneten Wert von 473,6 steps/K festgelegt wurde. Die Datenpunkte für  $T_{S2}$  wurden dabei doppelt gewichtet. Dadurch konnten die beiden in schwarz eingezeichneten Geraden als neue Korrekturfunktionen ermittelt werden.

von 473,6 steps/K. Somit ist der Autofokus aktuell ca. 15% zu stark eingestellt und eine leichte Abschwächung durch Verändern der Korrekturfunktionen wäre sinnvoll.

Mit Hilfe der berechneten Steigung von 473,6 steps/K kann nun für beide Teleskope eine lineare Regression mit den Messwerten aus Abbildung 3.1 durchgeführt werden. Dies ist in Abbildung 3.9 dargestellt. Die Steigung wurde dabei auf den berechneten Wert festgelegt. Außerdem wurden die Messwerte für  $T_{S2}$  doppelt gewichtet, um den Einfluss einer möglichen Verzerrung der Messwerte für  $T_{rod}$  durch direkte Sonnenbestrahlung zu minimieren (vgl. Abschnitt 3.1.1). Aus der Regression erhält man dann für das NWT und das SET jeweils eine Geradengleichung, die als neue Korrekturfunktion für den Autofokus verwendet werden kann. Es wurden folgende Funktionen ermittelt:

NWT:

$$pos_{focus} = T_{mean} \cdot 473,6 \text{ steps/K} + 6826 \text{ steps} \quad (3.11)$$

SET:

$$pos_{focus} = T_{mean} \cdot 473,6 \text{ steps/K} + 4840 \text{ steps} \quad (3.12)$$

mit  $T_{mean} = (2 \cdot T_{S2} + T_{rod})/3$  in °C und  $pos_{focus}$  in Motorschritten (steps).

In Abschnitt 3.1.2 wurde bereits beschrieben, dass der Motor, der für die Position

der Glasfaser verantwortlich ist, eine maximale Reichweite von 25000 steps besitzt. Die niedrigste registrierte Temperatur ( $T_{mean}$ ) betrug in den Jahren 2013 und 2014 bisher  $-9,0^{\circ}\text{C}$  am SET (Januar 2014). Die höchste Temperatur ( $T_{mean}$ ) wurde ebenfalls am SET registriert, mit  $33,3^{\circ}\text{C}$  (Juni 2013). Das ist eine Temperaturspanne von 42,3 K über das Jahr hinweg. Aus den neuen Korrekturfunktionen lässt sich der Temperaturbereich berechnen, der mit der Reichweite des Motors abgedeckt werden könnte. Für das NWT ergibt sich ein Bereich von  $-14,4^{\circ}\text{C}$  bis  $38,4^{\circ}\text{C}$ , für das SET ein Bereich von  $-10,2^{\circ}\text{C}$  bis  $42,6^{\circ}\text{C}$ . Mit den ermittelten Korrekturfunktionen würde man also die höchsten und tiefsten Temperaturen aus den Jahren 2013 und 2014 erreichen und müsste die Position des Motors in der Fokalbox nicht wie in Abschnitt 3.1.2 beschrieben, verändern.

## 3.4 Auswirkungen des Fokus auf das Lidar-Signal

Bisher wurde beschrieben, wie der Autofokus des ALOMAR RMR-Lidar arbeitet und untersucht, wo mögliche Schwachstellen des Systems liegen. Außerdem wurde eine Berechnung zur optimalen Verschiebung des Fokus in Abhängigkeit von der Temperatur angestellt und diese mit dem aktuellen System verglichen. In diesem Abschnitt wird nun der Einfluss des Fokus, bzw. des Autofokus auf die Rückstreusignale des Lidar analysiert.

Die Rayleigh-Integrationsmethode zur Bestimmung von Temperaturprofilen wurde bereits in Abschnitt 2.2.3 dargestellt. Dort wurde erläutert, wie man mit Hilfe von einem Höhenprofil der relativen Dichte durch ein paar wenige Annahmen und einem gegebenen Startwert ein Höhenprofil der Temperatur erhält. Ausgangspunkt dieser Methode ist jedoch das bei der Lidar-Messung erhaltene Rückstreuprofil, da dieses proportional zum Dichteprofil ist. Deshalb ist ein sauberes und exaktes Rückstreusignal enorm wichtig für die zuverlässige Bestimmung von möglichst genauen Temperaturprofilen der Atmosphäre.

In Abbildung 3.10 sind die Rückstreuprofile der beiden Systeme des ALOMAR RMR-Lidars von einer 35-stündigen Messung am 31.5.2013 dargestellt. Dabei wurden die 8 Rayleigh-Kanäle der 3 Wellenlängen des Lasers eingezeichnet. Für die Wellenlängen 355 nm (*ultraviolet*) und 532 nm (*visible*) gibt es jeweils einen *high*-, *middle*- und *low*-Kanal. Die Auftrennung dafür erfolgt mittels Strahlteiler über die Intensität. Für die Wellenlänge 1064 nm (*infrared*) gibt es nur einen *high*- und einen *low*-Kanal. Das Signal ist in Impulsen pro Schuss und Kilometer logarithmisch über die Höhe aufgetragen. Die Daten wurden über den gesamten Zeitraum der Messung gemittelt. Man erkennt an dem Verlauf der Profile die Proportionalität zu dem Dichteprofil in Abbildung 2.4. Die einzelnen Kanäle haben jeweils ein Maximum in unterschiedlichen Höhen. Von diesem Maximum aus nimmt das Signal mit zunehmender Höhe ab. Wolken führen zu einer lokalen Verstärkung des Rückstreusignals. So erkennt man z.B. im Verlauf des VH-Kanals (*visible, high*) den Einfluss von NLCs

### 3.4 Auswirkungen des Fokus auf das Lidar-Signal

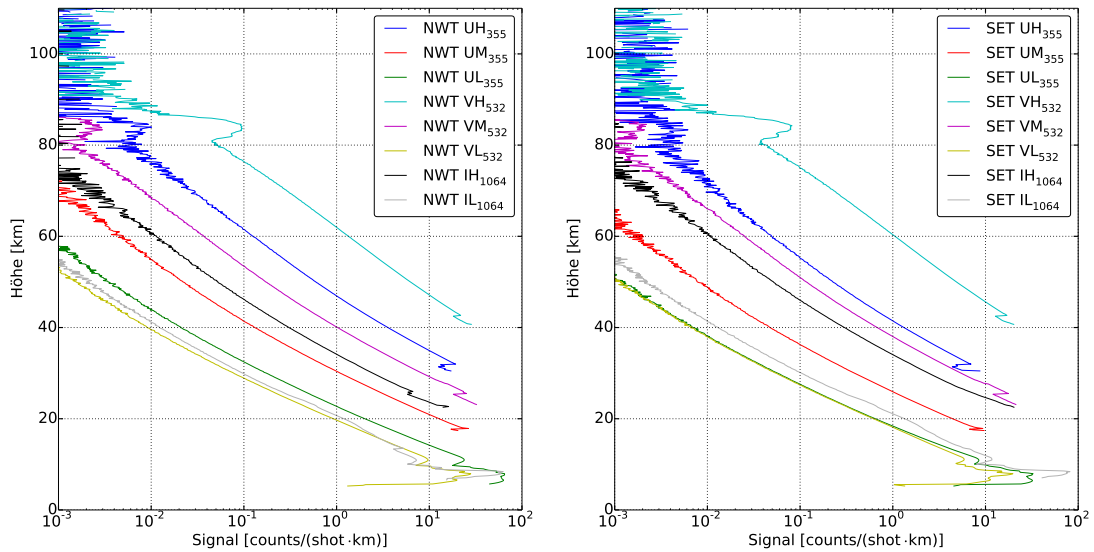


Abbildung 3.10: Rückstreupprofile der beiden Systeme des ALOMAR RMR-Lidar von einer 35-stündigen Messung am 31.5.2013. Das zeitlich gemittelte Messsignal in Impulsen pro Schuss und Kilometer (entspricht einer Messrate, da Kilometer über die Lichtgeschwindigkeit eine Zeit ergeben) wurde logarithmisch über die Messhöhe aufgetragen. Es wurden die 8 Rayleigh-Kanäle der 3 Laser-Wellenlängen (355 nm/*ultraviolet*, 532 nm/*visible*, 1064 nm/*infrared*) eingezeichnet. Dabei gibt es 3 verschiedene Höhenbereiche (*high*, *middle*, *low*). Die Signalstärke nimmt bei den Kanälen jeweils mit der Höhe ab. Das lokale Maximum beim VH-Kanal in etwas über 80 km Höhe kommt durch eine NLC zustande.

in ca. 83 km Höhe. Trotz des zeitlichen Mitteln kommt es im oberen Bereich der Profile zu sehr starken Schwankungen des Signals. Das führt dazu, dass die berechneten Temperaturprofile ebenfalls ungenauer werden in diesen Höhenbereichen. Für exaktere Bestimmungen der Temperatur in solchen Höhen werden unter anderem Na-Lidars eingesetzt, die die *Resonanz-Streuung* an Natriumatomen zwischen 80 km und 110 km nutzen und dort sehr viel zuverlässigere Ergebnisse liefern.

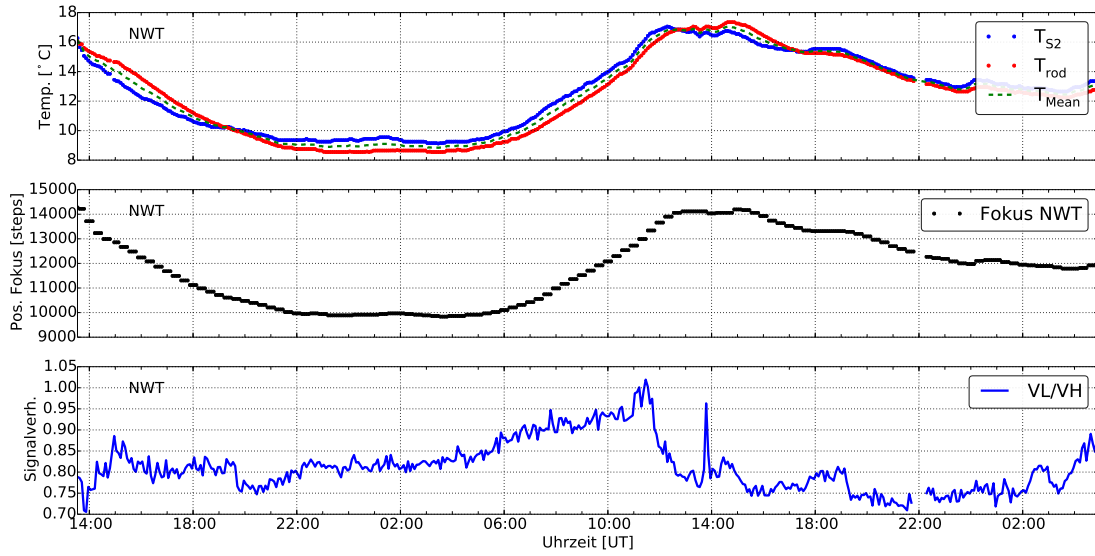
Um den Einfluss des Fokus auf die Rückstreupprofile und damit auf die daraus ermittelten Temperaturprofile zu untersuchen, wird nicht das Lidar-Signal direkt verwendet. Statt dessen wird das Signalverhältnis aus zwei Kanälen betrachtet. Dafür wird in beiden Kanälen eine Höhe gesucht, die wenige Kilometer über dem Signalmaximum liegt und der Quotient aus den Signalwerten an dieser Stelle gebildet. Idealerweise sollte dieser Quotient, das Signalverhältnis der beiden Kanäle, im Laufe einer Messung bis auf kleinere Störungen (z.B. durch die Strahlstabilisierung) relativ konstant bleiben. Eine nicht korrekte Fokussierung wirkt sich jedoch auf die DOF aus (vgl. Abschnitt 2.2), da sich der Höhenbereich verschiebt, aus dem das komplette zurückgestreute Licht in die Glasfaser eingekoppelt werden kann. Das hat vor allem auf die untere und obere Grenze des Messbereichs einen starken Einfluss. Ist der Fokus z.B. in Richtung größerer Höhen verschoben, so erhält man ein zu schwaches Signal aus niedrigen Höhen. Veränderungen im Verhältnis aus einem *low*- und einem *high*-Kanal erlauben daher Rückschlüsse auf eine zu starke Verschiebung des

Fokus nach oben oder unten.

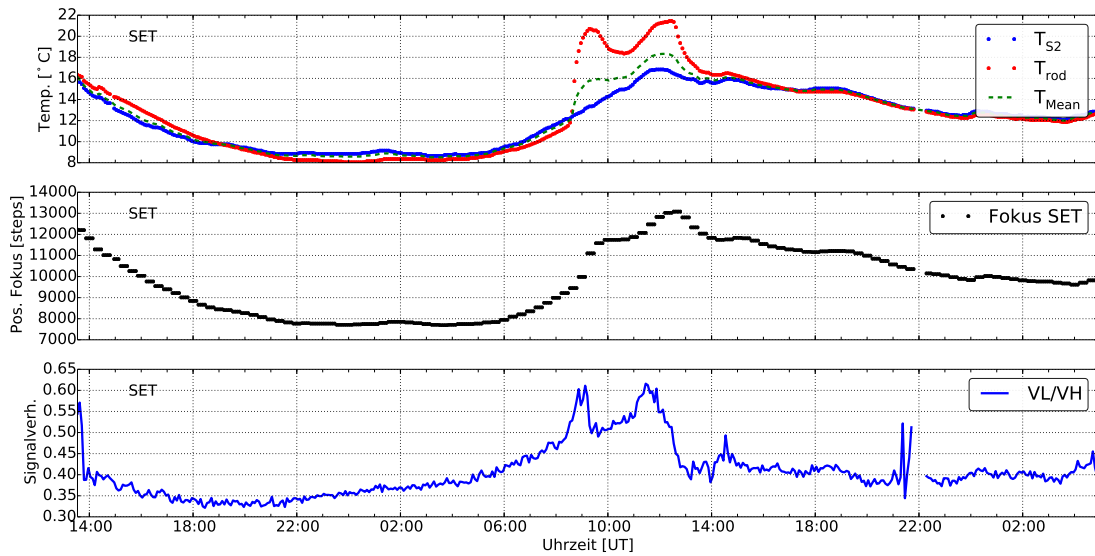
Zur Untersuchung der Auswirkung des Fokus auf die Rückstreusignale wurde somit der Verlauf des Signalverhältnisses aus den Kanälen VL und VH über den Zeitraum einer ganzen Messung betrachtet. Dafür wurden zwei lange Messungen aus den Sommermonaten gewählt, bei denen große Temperaturdifferenzen gemessen wurden. In Abbildung 3.11 ist der Verlauf des Signalverhältnisses VL/VH zusammen mit dem Verlauf des Fokus und dem Verlauf der Temperaturen  $T_{rod}$ ,  $T_{S2}$  und  $T_{mean}$  für das NWT und das SET während einer 39-stündigen Messung am 15.8.2013 dargestellt. Abbildung 3.12 zeigt die gleichen Verläufe bei einer 34-stündigen Messung am 28.7.2013.

In den Abbildungen ist ein deutlicher Zusammenhang zwischen dem Temperaturverlauf und dem Verlauf des Signalverhältnisses VL/VH zu erkennen. Bei einer Erhöhung der Temperatur in den Mittagsstunden ist im Verlauf des Signalverhältnisses ebenfalls eine Erhöhung des Wertes zu erkennen. Die Verläufe sehen teilweise sehr ähnlich aus. Bei der Messung vom 15.8.2013 ist dies in (b) gut zu sehen. Das Signalverhältnis bleibt also im Laufe einer Messung nicht konstant, sondern zeigt starke Schwankungen, die sich an den Veränderungen der Temperatur orientieren. Dieses Verhalten bestätigt das Ergebnis aus Abschnitt 3.1.3, dass der Autofokus mit einer zeitlichen Verzögerung arbeitet. Wenn man bei dem Teleskop die Fokussierung vom Unendlichen zu geringeren Höhen verschieben will, so verschiebt sich dabei der Fokuspunkt auf der optischen Achse nach unten bzw. nach hinten. Die Glasfaser muss also nach unten gefahren werden. Bei einer Erwärmung der Teleskopstruktur und der daraus resultierenden Längenänderung verschiebt sich der Fokuspunkt nach oben. Durch die Verspätung der Fokuskorrektur liegt die Glasfaser dann unterhalb des optimalen Fokuspunktes für 26,1 km (*Baumgarten*, 2001). Das bedeutet, dass sich die DOF (vgl. Abschnitt 2.2) verändert und das Teleskop zu nah fokussiert. Für das Signalverhältnis ergibt sich dadurch eine Erhöhung des Wertes, da das Signal im Kanal VL stärker wird. Fällt die Temperatur wieder, so verschiebt sich der Fokuspunkt nach unten und die Glasfaser befindet sich darüber. Dies hat den Effekt, dass zu weit fokussiert wird und das Signal im Kanal VL schwächer wird. Der Wert des Signalverhältnisses sinkt somit. Aufgrund der zeitlichen Verzögerung bei der Korrektur des Autofokus kommt es also zu einem starken Einfluss der Temperatur auf die Rückstreuprofile des ALOMAR RMR-Lidars. Das hat wiederum zur Folge, dass sich Abweichungen in den berechneten Rayleigh-Temperaturprofilen ergeben. Der Effekt, den die Defokussierung auf die berechnete Temperatur hat, wurde von *Schöch and Baumgarten* (2003) dargestellt. Mit einer schnelleren und direkteren Fokuskorrektur könnte man die Signalverhältnisse im Laufe einer Messung besser konstant halten und somit den Fehler in den Temperaturprofilen minimieren.

### 3.4 Auswirkungen des Fokus auf das Lidar-Signal



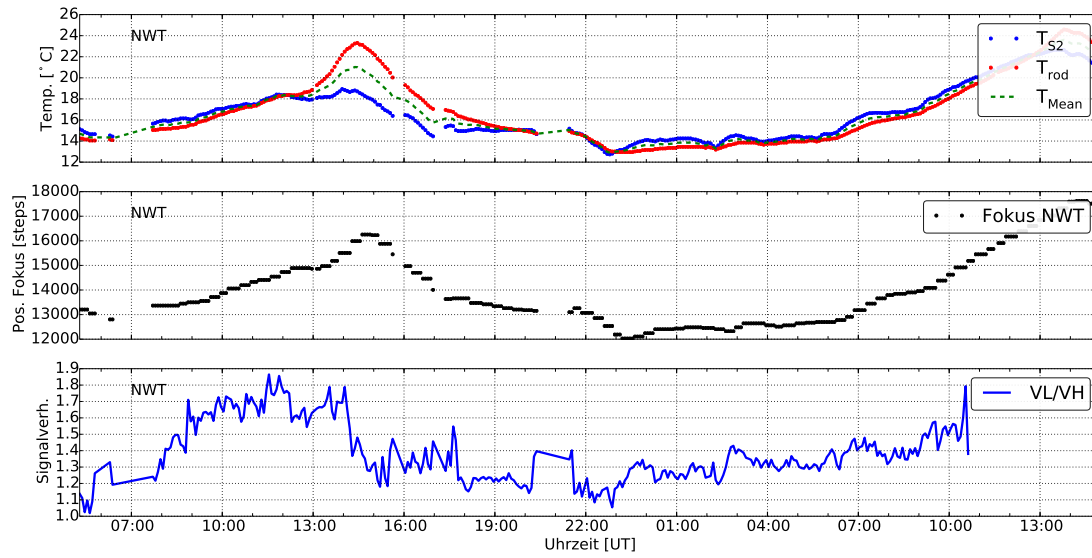
(a) NWT



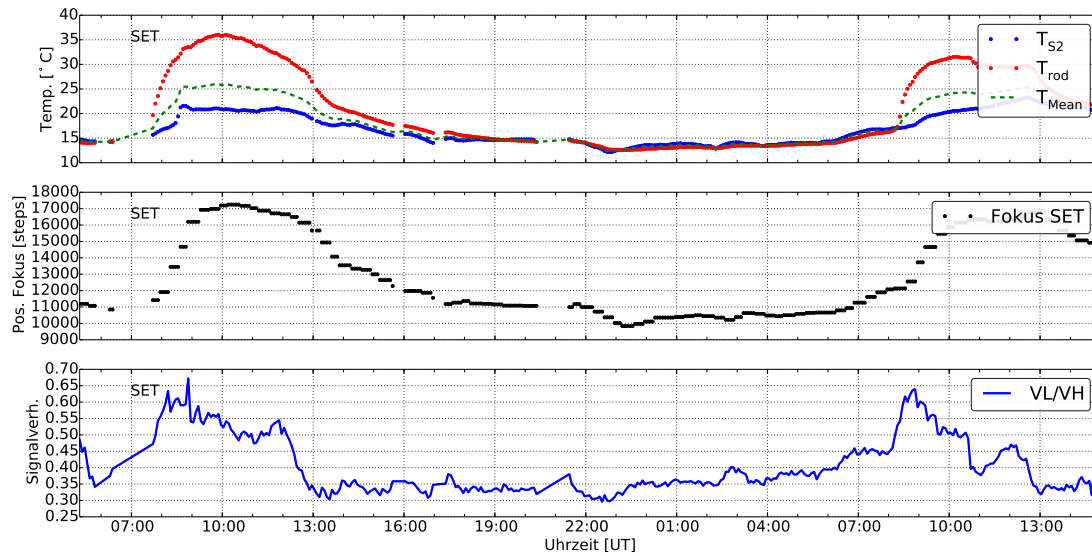
(b) SET

Abbildung 3.11: Verlauf der Temperaturen, der Fokusposition und des Signalverhältnisses VL/VH während einer 39-stündigen Messung am 15.8.2013 für das NWT (a) und das SET (b). Der obere Graph zeigt jeweils den Verlauf der gemessenen Temperaturen am Teleskop, sowie die berechnete Temperatur  $T_{mean}$ , aus der die Position des Fokus abgeleitet wird. Der mittlere Graph zeigt die Position des Fokus und der untere Graph zeigt den Verlauf des Verhältnisses aus den Signalkanälen VL und VH. Dazu wurde über den gesamten Zeitraum der Messung der Quotient aus den zeitlichen Verläufen der beiden Kanäle gebildet. Als Höhe wurde ein fester Wert, einige Kilometer über dem Signalmaximum gewählt.

### 3.4 Auswirkungen des Fokus auf das Lidar-Signal



(a) NWT



(b) SET

Abbildung 3.12: Verlauf der Temperaturen, der Fokusposition und des Signalverhältnisses VL/VH während einer 34-stündigen Messung am 28.7.2013 für das NWT (a) und das SET (b), wie in Abbildung 3.11.





# Kapitel 4

## Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Fokusslage des ALOMAR RMR-Lidars in Nord-Norwegen untersucht. Dabei lag der Schwerpunkt der durchgeführten Untersuchungen auf dem Autofokus-System, das 2007 in das Gerät integriert wurde. Es hat die Aufgabe, durch eine gezielte Verschiebung der Glasfaser, in die das aus der Atmosphäre eingefangene Rückstreulicht eingekoppelt werden soll, Defokussierungen entlang der optischen Achse zu kompensieren. Diese kommen wiederum durch eine temperaturbedingte Längenänderung der Teleskopstruktur zustande. Die Positionierung der Glasfaser wird über eine Korrekturfunktion bestimmt und von einem Motor in der Fokalbox ausgeführt.

Zunächst wurde die Funktionsweise des Autofokus erläutert und dargestellt. Durch die Analyse von Messdaten konnte deutlich gemacht werden, wie stark der Einfluss der Temperatur auf die Fokusslage während der Messung ist. Bei den Messungen im Sommer sind regelmäßig Verschiebungen der Position der Glasfaser um mehr als 1 cm nötig. Im letzten Teil wurde außerdem gezeigt, dass auch die Rückstreusignale, mit deren Hilfe die Rayleigh-Temperaturprofile berechnet werden, stark von einer Verschiebung des Fokuspunktes beeinflusst werden. Eine exakte und zuverlässige Korrektur der Fokusslage durch den Autofokus ist daher enorm wichtig, weshalb die Integration des Systems die Datenqualität des Lidars stark verbessert.

Anhand verschiedener Analysen der vorhandenen Mess- und Systemdaten von Januar 2013 bis März 2014 war es jedoch möglich, Situationen aufzuzeigen, in denen die Fokussierung nicht optimal abläuft. So werden z.B. die Sensoren, die die Temperatur an den Stangen des Teleskops messen, im Sommer während der Mittagsstunden direkt von der Sonne angestrahlt. Dadurch registrieren sie eine zu hohe Temperatur und verzerren die mittleren Temperaturen  $T_{mean}$ . Der Einfluss wird zwar teilweise durch eine entsprechende Gewichtung in der Korrekturfunktion abgeschwächt, ist aber in einigen Fällen immer noch sehr stark. Weiterhin treten im Winter immer wieder Temperaturen auf, die Defokussierungen zur Folge haben, welche der Autofokus nicht mehr korrigieren kann. Das liegt daran, dass der Motor die untere Grenze seiner Reichweite erreicht. Dies bedeutet, dass unterhalb einer bestimmten Temperatur keine Korrektur der Fokusposition mehr möglich ist. Zusätzlich konnte

---

gezeigt werden, dass es im Prozess der Bestimmung und der darauf folgenden Ausführung der Fokuskorrektur zu zeitlichen Verzögerungen von bis zu 30 min kommen kann. Das führt dazu, dass die Fokusposition der aktuellen Temperatur stets hinterherhinkt und die Glasfaser im Bereich eines Temperaturmaximums teilweise sogar in die falsche Richtung verschoben wird. Zur Überprüfung der Korrekturfunktionen wurde eine Berechnung zur theoretischen Verschiebung der Fokusposition durch thermische Längenänderungen der Teleskopstruktur angestellt. Diese ergab eine schwächere Korrektur als die, die der Autofokus momentan vornimmt.

So können als Ergebnis dieser Arbeit verschiedene Modifikationen zur Verbesserung des Autofokus-Systems vorgeschlagen werden. Durch eine geschickte Positionierung der Temperatursensoren an den Teleskopen kann verhindert werden, dass es durch direkte Sonnenbestrahlung zu einer Verfälschung von  $T_{mean}$  kommt. Es wäre zusätzlich sinnvoll, mehr als zwei Sensoren für die Temperaturbestimmung zu verwenden, um einen zuverlässigeren Wert zu erhalten, der möglichst unverfälscht ist. Darüber hinaus sollte eine Anpassung der Korrekturfunktionen an das Ergebnis der angestellten Berechnung vorgenommen werden. Dadurch würde sich zudem auch die Temperaturspanne, die der Autofokus abdecken kann, vergrößern und die bisher gemessenen Minimal- und Maximaltemperaturen würden die Reichweite des Motors nicht mehr überschreiten. Das heißt, es wäre nicht nötig, die Fokaloptik anders zu positionieren, was ein sehr aufwendiger Vorgang wäre. Sehr wichtig ist die Verkürzung der Zeiten in der Software, die aus den registrierten Temperaturen die Faserpositionierung berechnet und den entsprechenden Befehl an den Motor in der Fokalbox weitergibt. Wenn man hierbei die maximale zeitliche Verzögerung von einer halben Stunde auf wenige Minuten reduzieren würde, wäre eine sehr viel direktere Fokuskorrektur möglich. Das hätte unter anderem zur Folge, dass die Signalverhältnisse im Laufe einer Messung sehr viel konstanter bleiben und die Datenqualität sich verbessert.

Die in dieser Arbeit dargestellten Verbesserungen des Autofokus wurden in zwei Stufen in das System integriert: Am 7.6.2014 wurde das System wie vorgeschlagen beschleunigt und zeitliche Verzögerungen minimiert. Am 13.8.2014 wurden die verbesserten Korrekturfunktionen umgesetzt.

Es wurde deutlich, wie stark der Einfluss der Temperatur auf die Fokuslage ist und wie wichtig die Korrekturen des Autofokus-Systems für die Messqualität des ALOMAR RMR-Lidars sind. Mit Hilfe der Ergebnisse dieser Arbeit kann das System weiter verbessert werden. Zusammen mit einer leistungsfähigen Strahlstabilisierung und einer geringen Strahldivergenz führt ein optimierter Autofokus zu einem größeren Überlapp, bzw. zu einem geringeren Verlust von Rückstreulicht. Damit ist das System auch für sehr lange Messungen im Sommer gerüstet, bei denen große Temperaturamplituden auftreten und die Fokussierung sich mehrfach deutlich verändert. Insgesamt zeigt sich an diesem Beispiel, wie essentiell die Weiterentwicklung der Messtechnik für die Fernerkundung der Atmosphäre mit Lidargeräten ist. Sie sollte weiter vorangetrieben werden.

# Abbildungsverzeichnis

|      |                                                                                                                                            |    |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1  | Mittleres Temperaturprofil der Atmosphäre . . . . .                                                                                        | 3  |
| 2.2  | Höhenabdeckung verschiedener Sondierungsgeräte . . . . .                                                                                   | 4  |
| 2.3  | Allgemeiner Aufbau eines Lidar-Systems . . . . .                                                                                           | 5  |
| 2.4  | Dichte- und Temperaturprofil des RMR-Lidars . . . . .                                                                                      | 9  |
| 2.5  | Schematischer Aufbau des ALOMAR RMR-Lidars . . . . .                                                                                       | 10 |
| 2.6  | Teleskophalle mit den beiden Empfangsteleskopen und den BGM . .                                                                            | 11 |
| 2.7  | Aufbau der Fokalloptik . . . . .                                                                                                           | 13 |
| 3.1  | Temperatur-Fokus-Plot mit Funktionen zur Fokuskorrektur . . . . .                                                                          | 16 |
| 3.2  | Verlauf der Temperaturen und der Fokusposition während einer 42-<br>stündigen Messung am 5.6.2013 . . . . .                                | 18 |
| 3.3  | Verlauf des Sonnenstandes während der 42-stündigen Messung am<br>5.6.2013 . . . . .                                                        | 18 |
| 3.4  | Verlauf der Temperaturen und der Fokusposition während einer 50-<br>stündigen Messung am 10.1.2014 . . . . .                               | 20 |
| 3.5  | Verlauf der Temperatur $T_{mean}$ und der Fokusposition während eines<br>Ausschnittes aus einer 35-stündigen Messung am 31.5.2013. . . . . | 21 |
| 3.6  | Schematische Skizze der Teleskopstruktur . . . . .                                                                                         | 23 |
| 3.7  | <i>Raytracing</i> -Simulation zur Bestimmung der optischen Verstärkung . .                                                                 | 24 |
| 3.8  | Vergleich zwischen der berechneten Verschiebung des Fokus und den<br>Korrekturfunktionen der Teleskope . . . . .                           | 25 |
| 3.9  | Temperatur-Fokus-Plot mit berechneten Korrekturfunktionen . . . . .                                                                        | 26 |
| 3.10 | Rückstreuprofile von einer 35-stündigen Messung am 31.5.2013 . . . .                                                                       | 28 |
| 3.11 | Verlauf der Temperaturen, der Fokusposition und des Signalverhält-<br>nisses VL/VH während einer 39-stündigen Messung am 15.8.2013 . .     | 30 |
| 3.12 | Verlauf der Temperaturen, der Fokusposition und des Signalverhält-<br>nisses VL/VH während einer 34-stündigen Messung am 28.7.2013 . .     | 31 |



# Literaturverzeichnis

- Baumgarten, G. (2001), Leuchtende Nachtwolken an der polaren Sommermesopause: Untersuchungen mit dem ALOMAR Rayleigh/Mie/Raman Lidar, Ph.D. thesis, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn.
- Baumgarten, G. (2010), Doppler Rayleigh/Mie/Raman lidar for wind and temperature measurements in the middle atmosphere up to 80 km, *Atmospheric Measurement Techniques*, 3(6), 1509–1518.
- Fiedler, J., G. Baumgarten, and G. von Cossart (2008), A middle atmosphere lidar for multi-parameter measurements at a remote site, in *Proc. 24th Int. Laser Radar Conf*, pp. 824–827.
- Fiedler, J., G. Baumgarten, U. Berger, P. Hoffmann, N. Kaifler, and F.-J. Lübken (2011), NLC and the background atmosphere above ALOMAR, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(12), 5701–5717.
- Fiedler, J., Baumgarten, G. (2012), On the relationship between lidar sensitivity and tendencies of geophysical time series, in *The 26th International Laser Radar Conference, 25-29 June 2012, Porto Heli, Greece*.
- Hildebrand, J., G. Baumgarten, J. Fiedler, U.-P. Hoppe, B. Kaifler, F.-J. Lübken, and B. Williams (2012), Combined wind measurements by two different lidar instruments in the Arctic middle atmosphere, *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 5(3), 4123–4156.
- Höffner, J., and F.-J. Lübken (2007), Potassium lidar temperatures and densities in the mesopause region at Spitsbergen (78 N), *Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)*, 112(D20).
- Hongfang, L., and Y. Fan (2006), Gravity wave characteristics observed by lidar and radiosonde in Wuhan, *Chin. J. Geophys*, 49(6), 1582–1587.
- Hübner, F. (1998), Temperaturen der mittleren polaren Atmosphäre (15–80 km): Beobachtungen mit dem ALOMAR Rayleigh/Mie/Raman-Lidar 1995 und 1996 und Vergleiche, Ph.D. thesis.

- Kaifler, N., G. Baumgarten, J. Fiedler, and F.-J. Lübken (2013), Quantification of waves in lidar observations of noctilucent clouds at scales from seconds to minutes, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(23), 11,757–11,768.
- Kent, G. S., and R. W. H. Wright (1970), A review of laser radar measurements of atmospheric properties, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 32(5), 917–943.
- Lautenbach, J. (2007), Experimentelle Untersuchungen mit einem Lidar zur thermischen Struktur der Mesopausen-Region bei polaren und mittleren Breiten, Ph.D. thesis, IAP.
- Lübken, F.-J., K.-H. Fricke, and M. Langer (1996), Noctilucent clouds and the thermal structure near the Arctic mesopause in summer, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)*, 101(D5), 9489–9508.
- Middleton, W. E. K., Spilhaus, A. F. (1954), Meteorological instruments, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*.
- Mie, G. (1908), Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen, *Annalen der Physik*, 330(3), 377–445.
- Rauthe, M. S. (2008), Lidarmessungen von Temperaturen und Schwerewellen zwischen 1-105 km über Kühlungsborn (54 N, 12 O), Ph.D. thesis, IAP.
- Schöch, A. (2001), Untersuchung der Schwerewellen-Aktivität in der polaren Atmosphäre mit einem Rayleigh-Lidar auf Andøya in Nord-Norwegen, Ph.D. thesis, Leibniz-Inst. für Atmosphärenphysik.
- Schöch, A., and G. Baumgarten (2003), A new system for automatic beam stabilisation of the ALOMAR RMR-lidar at Andoya in Norway, in *European Rocket and Balloon Programmes and Related Research*, vol. 530, pp. 303–307.
- Schöch, A., G. Baumgarten, and J. Fiedler (2008), Polar middle atmosphere temperature climatology from Rayleigh lidar measurements at ALOMAR (69 N), in *Annales Geophysicae*, vol. 26, pp. 1681–1698, Copernicus GmbH.
- Tuve, M., E. Johnson, and O. Wulf (1935), A new experimental method for study of the upper atmosphere, *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*, 40(4), 452–454.
- von Zahn, U., G. von Cossart, J. Fiedler, K. H. Fricke, G. Nelke, G. Baumgarten, D. Rees, A. Hauchecorne, and K. Adolfsen (2000), The ALOMAR Rayleigh/Mie/Raman lidar: objectives, configuration, and performance, *Annales Geophysicae*, 18, 815–833.
- Weitkamp, C. (2005), *Range-resolved optical remote sensing of the Atmosphere*, Springer.
- Young, A. T. (1981), Rayleigh scattering, *Applied Optics*, 20(4), 533–535.

## **Selbstständigkeitserklärung**

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.

---

Ort, Datum

---

Unterschrift des Verfassers