

Bachelorarbeit

zur Erlangung des ersten akademischen Grades

Entwicklung und Erprobung eines Polarisationsfilters zur
Untergrundreduzierung bei einem Rayleigh-Mie-Raman-Lidar

vorgelegt von

Madlen Kanning, geb. Schmalfuß

geboren am 16.11.1988 in Zwickau

Studentin der Physikalischen Technologien an der Westsächsischen Hochschule Zwickau

Studienschwerpunkt Energie und Umwelt

Matrikel 072201/31

Betreuer:

Prof. Dr. rer. nat. habil. Peter Hartmann (Westsächsische Hochschule Zwickau)

Dr. rer. nat. Michael Gerding (Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik, Kühlungsborn)

Ausgabedatum: 20.01.2010

Abgabedatum: 07.03.2010

Autorenreferat

Mit der Lidartechnik wurde es möglich die Atmosphäre auch in sehr großen Höhen zu untersuchen. Es wird zuvor ausgesandtes und in der Atmosphäre zurückgestreutes Laserlicht detektiert. Das erhaltene Signal gibt Aufschluss über die höhenabhängigen Temperaturen. Das Rayleigh-Mie-Raman-Lidar erreicht nachts eine Messhöhe von 90 km. Bei Messungen am Tag kann diese Höhe mit den bestehenden Systemen noch nicht erreicht werden, da das Sonnenlicht als zusätzliche Strahlungsquelle das zurückerhaltene Messsignal überlagert.

Ziel dieser Arbeit war, durch die Konzipierung und den Einbau eines Polarisationsfilters in den Empfangszweig des Rayleigh-Mie-Raman-Lidars den durch das Sonnenlicht entstehenden Untergrund weiter zu reduzieren. Da das Laserlicht linear polarisiert ist, kann ein Teil des teilweise polarisierten Sonnenlichtes ohne Signalverluste herausgefiltert werden. Um die Wirksamkeit des Polarisators abschätzen zu können, wurden daher Messungen zur Polarisation des Sonnenlichtes durchgeführt. Daraus konnten Aussagen über die Abhängigkeit der Polarisationsseigenschaften des Untergrundes von der Tageszeit getroffen werden. Auf Grund dieser Abhängigkeiten wurde der Wirkungsgrad des Polarisationsfilters zu bestimmten Tageszeiten berechnet. Diesen Ergebnissen zu Folge kann mit dem neuen Polarisationsaufbau der Untergrund um etwa 24 - 76 % reduziert werden.

Abstract

With the help of lidar technology one was able to investigate the atmosphere in regions of great heights. Laser light emitted into the atmosphere is backscattered by molecules and aerosoles causing a measurable signal that can be detected giving information about height dependent temperatures. The Rayleigh-Mie-Raman lidar reaches altitudes of 90 km at night. During daytime this height can actually not be reached with existing systems since the sunlight, as additional light source, overlays the backscattered signal.

Aim of this thesis was to design and implement a polarising filter into the receiving system of the Rayleigh-Mie-Raman lidar. By this the solar induced background shall be reduced. Since the used laser light is linearly polarised, implementing such a filter does not have any impact on the signal yet it inhibits transmission of partially polarised sunlight. To assess efficiency of the polarizer measurements of the skylight polarisation were taken. Hence it is possible to draw conclusions of the background polarisation and its time dependence. Based on this dependence the efficiency factor at different times has been determined. According to this estimation the polarising filter reduces the background by 24 - 76 %.

Danksagung

Ich danke Professor Hartmann, der mir den Tipp gab mein Praktikum am IAP zu machen und mir hilfsbereit zur Seite stand. Vielen Dank auch an Professor Lübken, der mir diese interessante Arbeit ermöglicht hat und bei der Auswahl des Themas auf meine Interessen eingegangen ist. Vielen Dank auch all den anderen Mitarbeitern des Instituts, die direkt oder indirekt zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt Michael und Maren. Danke Michael, dass du mir immer alles so lange erklärt hast, bis mein fragendes Gesicht völlig verschwunden war. Danke für deine Geduld, deine Gelassenheit und dafür, dass du dir immer Zeit für mich genommen hast. Danke Maren, dass ich mich durch deine sonnige Art gleich im Institut wohl gefühlt habe, für deine Anregungen und deine Hilfe bei allen Fragen.

Ich möchte auch meiner Familie und meinem Freund Kay danken, die mich immer unterstützt haben.

Inhaltsverzeichnis

Kurzzeichenverzeichnis	II
Abkürzungsverzeichnis.....	IV
1. Einleitung	1
2. Grundlagen der Temperaturmessung mit Lidars	5
2.1. Grundgleichungen atmosphärischer Prozesse.....	5
2.2. Lidargleichung	7
2.3. Streuprozesse in der Atmosphäre.....	8
2.4. Das Rayleigh-Mie-Raman-Lidar des IAP.....	11
2.5. Probleme der Tageslichtmessung.....	16
2.5.1. Der Signaluntergrund.....	16
2.5.2. Polarisiertes Himmelslicht.....	20
3. Entwicklung und Aufbau des Polarisationsfilters im neuen Empfangszweig	23
3.1. Konzeption der Linsen und Berechnung des Strahldurchmessers	24
3.2. Konzeption des Polarisators	26
3.3. Technische Umsetzung.....	28
4. Ergebnisse der Atmosphärenmessungen.....	30
4.1. Messungen zur Polarisation des Untergrundes.....	30
4.1.1. Der Polarisationsgrad des Untergrundsignals	31
4.1.2. Die Polarisationsrichtung des Untergrundsignals	32
4.2. Optimale Stellung des Polarisators	34
4.3. Abschätzung der Wirksamkeit des Polarisationsfilters	35
5. Ausblick und Zusammenfassung	41

Kurzzeichenverzeichnis

"	Zoll (1 Zoll = 25,4 mm)
A	Teleskopfläche
d_{Linse}	Durchmesser der ausgeleuchteten Linsenfläche, Strahldurchmesser
d_T	Durchmesser des Empfangsteleskops (800 mm)
f_L	Brennweite der Linse
f_T	Brennweite des Empfangsteleskops (3200 mm)
$F(z)$	Funktion zur Beschreibung der geometrischen Überlappung zwischen Laserstrahl und dem Gesichtsfeld des Teleskops
g	Erdbeschleunigung
$H_{1,2}$	Höhe des Streuprozesses
I	Intensität des vom Lidar empfangenen und detektierten Signals
I_0	Intensität der vom Laser ausgesendeten Pulse
k_B	Boltzmannkonstante ($1,381 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$)
$\overline{m}$	Mittlere Molekülmasse
N	Teilchenanzahl
n	Teilchenzahldichte
n_0	Teilchenzahldichte bei der höchsten Höhe, Startwert der Integration
p	Druck
p_0	Druck bei der höchsten Höhe, Startwert der Integration
R	Universelle Gaskonstante ($8,315 \frac{J}{K \cdot mol}$)
R^2	Korrelationskoeffizient
$\text{Signal}_{\text{Min}}$	kleinstes messbares Signal
SNR	Signal-Rausch-Verhältnisses, Maß für die Signalqualität
T	Temperatur
T_0	Temperatur bei der höchsten Höhe, Startwert der Integration
T_{frost}	Gefrierpunkt
T_P	Transmission p - polarisiertes Licht
T_S	Transmission s - polarisiertes Licht
$t_{1,2}$	Zeit zwischen dem Aussenden des Laserpulses und dem Streuprozess
U	Intensität/Zählrate des Untergrundsignals
U_{Min}	Minimum der Untergrundzählrate
U_{Max}	Maximum der Untergrundzählrate
$U_{12:00 \text{ UT}}$	Untergrundzählrate um 12:00 UT

V	Volumen
z	Höhe (in der Atmosphäre)
z_0	höchste Messhöhe, Startwert der Integration
Δz	Höhenintervall
$\beta, \beta_{\text{Ges}}$	Gesamtrückstreukoeffizient
β_{Rayleigh}	Rückstreukoeffizient der Rayleighstreuung
β_{Aerosol}	Rückstreukoeffizient der Aerosolstreuung
β_{Raman}	Rückstreukoeffizient der Ramanstreuung
β_{Resonanz}	Rückstreukoeffizient der Resonanzstreuung
$\beta_{\text{elastisch}}$	Rückstreukoeffizient aller elastischen Streuprozesse
$\beta_{\text{inelastisch}}$	Rückstreukoeffizient aller inelastischen Streuprozesse
η	Wirkungsgrad des Polarisators (zu einer bestimmten Zeit)
η_{Ges}	Wirkungsgrad des Polarisators in Abhängigkeit von U_{Min} und U_{Max}
$\eta(\lambda)$	Wirkungsgrad des Empfangszweiges
λ	Wellenlänge
ρ	Dichte
σ	Rauschen

Abkürzungsverzeichnis und Indices

Abb.	Abbildung
Abschn.	Abschnitt
APD	Avalanche Photodiode, dt. Lawinenphotodiode
a, b	Parameter der angepassten linearen Funktion
BK7	Bor-Kronglas 7
bzw.	beziehungsweise
ca.	zirka
CCD-Kamera	Charge-Coupled Device-Kamera, Kamera zur Beobachtung des Laserstrahls
CIRA-86	COSPAR International Reference Atmosphere, Referenzatmosphäre, Modell zur Beschreibung der atmosphärischen Parameter
COSPAR	Committee on Space Research, Internationale Organisation auf den Gebieten Weltraum- und Atmosphärenforschung
dt.	zu Deutsch
E-Feld	Elektrisches Feld
engl.	in Englisch
et al.	und andere
ff.	und Folgende
FOV	Field of View, Gesichtsfeld des Empfangsteleskops
FPI	Fabry-Perot-Interferometer
HR608/HT532	Wellenlängenabhängiger Strahlteiler
IAP	Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik
IF	Interferenzfilter
K-Lidar	Kaliumlidar, Metallresonanzlidar des IAP
LIDAR	Light Detection and Ranging
Nd:YAG-Laser	Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Laser, Sendeeinheit des RMR-Lidars
NLC	noctilucent clouds, dt. leuchtende Nachtwolken
P (1, 2, 3, 4)	Parameter der angepassten Sinusschwingung
PC	Personal Computer, kurz Computer
PMT	Photomultiplier Tube, hochempfindlicher Detektor, Elektronenvervielfacher
R	Reflexion

Rot. Raman	Rotations-Ramanstreuung
RMR	Rayleigh, Mie, Raman
S.	Seite
Tab.	Tabelle
UT	Universal Time, international gültig, Zeit für den 0. Längengrad, Winterzeit: $UT = MEZ + 1h$, Sommerzeit $UT = MEZ + 2h$
UV-Licht	Ultraviolettes Licht ($3,9 \cdot 10^2 \dots 10 \text{ nm}$)
vgl.	vergleichsweise
z. B.	zum Beispiel
3D	3-dimensional

1. Einleitung

Die Atmosphäre bildet den Schutzfilm der Erde, ohne sie wäre auf der Erde kein Leben möglich. Die Atmosphäre ist bis heute für die Forscher von großem Interesse. Seit dem letzten Jahrhundert finden Untersuchungen der Atmosphäre, über die Meteorologie hinaus, statt. Im Jahre 1902 machte der deutsche Meteorologe Richard Aßmann zeitgleich mit Léon-Philippe Teisserenc de Bort eine Entdeckung, die ihnen später den Ruf als Begründer der Aerologie einbrachte. Sie fanden heraus, dass oberhalb von 11 km die Temperatur nicht wie erwartet weiter abnahm, sondern konstant blieb. Sie entdeckten die Tropopause. Mit der Zeit konnte die Atmosphäre in immer höheren Regionen untersucht werden. Man stellte fest, dass in einigen Bereichen der Atmosphäre die Temperatur mit der Höhe abnahm und es in anderen Bereichen umgekehrt war.

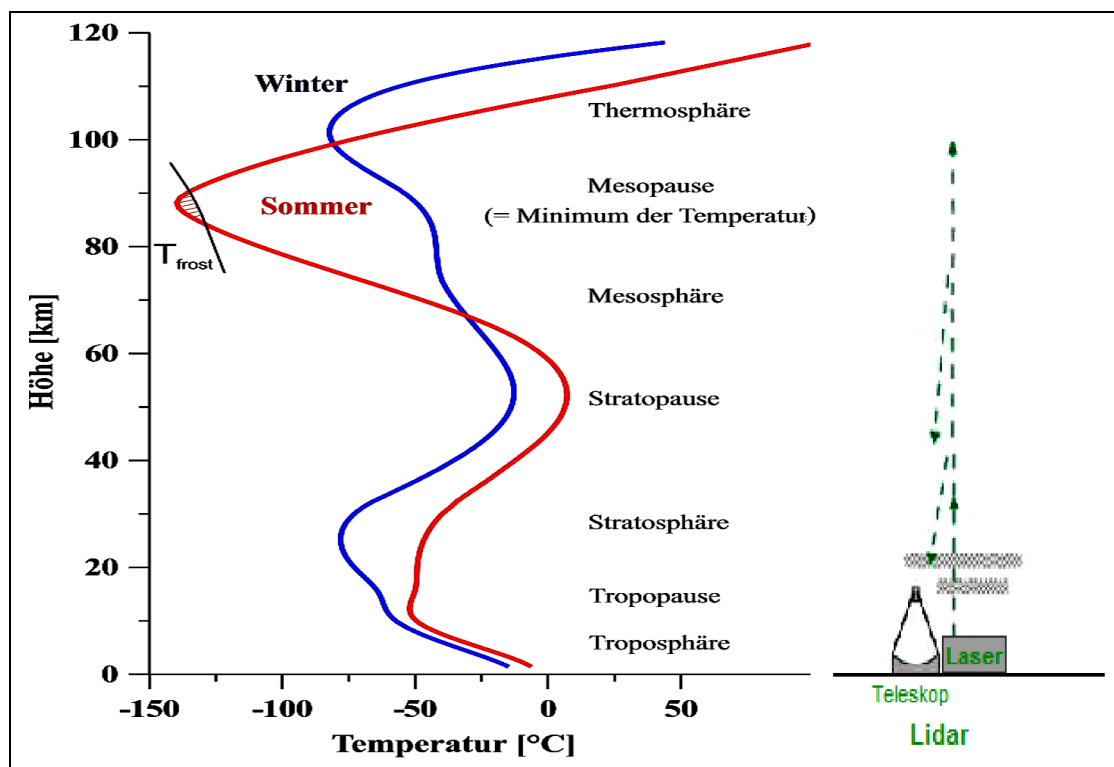


Abb. 1.1.: Temperaturprofil der Atmosphäre für Sommer und Winter mit Beschriftung der verschiedenen Atmosphärenschichten. Im rechten Teil der Abbildung wird das Messprinzip des Lidars angedeutet. Der Laserstrahl wird jeweils an Luftmolekülen und in einer Höhe von 80 – 105 km an Metallspuren gestreut. Unterhalb von 30 km wird der Laserstrahl an Aerosolen und Wasserdampf geschwächt. [vgl. Abb.: Poster Optik 01 im IAP]

Basierend auf dieser Tatsache wird die Atmosphäre, wie in Abbildung 1.1. zu sehen ist, höhenabhängig in vier verschiedene Schichten - so genannte Sphären - unterteilt. Die zwischen den Sphären befindlichen Grenzschichten, in denen ein Temperaturumschwung stattfindet, werden Tropo-, Strato- und Mesopause genannt. Die Einteilung der Sphären erfolgt entsprechend des positiven oder negativen vertikalen Temperaturgradienten. Die unterste Schicht ist die Troposphäre (bis ca. 12 km). Hier nimmt die Temperatur stetig ab. Innerhalb der Troposphäre befinden sich 99 % des Wasserdampfes, damit ist sie für das Wetter ausschlaggebend [vgl. Astronomie]. In der Stratosphäre (bis ca. 50 km) steigt die Temperatur nach wenigen Kilometern wieder leicht an. Dies ist auf die Ozonschicht zwischen 20 und 55 km [Roedel, 1992, S. 14] zurückzuführen, die das energiereiche UV-Licht der Sonneneinstrahlung absorbiert. In der Mesosphäre (bis ca. 100 km) fällt die Temperatur wieder. Die Thermosphäre (oberhalb von 100 km) ist der Sonneneinstrahlung und dem UV-Licht sehr stark ausgesetzt. Hier wird daher ebenfalls ein großer Teil der kurzwelligen Strahlung absorbiert, darum steigen hier die Temperaturen wieder sehr schnell an. In Abbildung 1.1. ist außerdem zu erkennen, dass sich die Mesosphäre im Sommer, auf Grund verschiedener dynamischer Prozesse in der Atmosphäre, besonders stark abkühlt.

Viele Rätsel, die die Atmosphäre aufgibt, sind bis heute noch nicht vollständig geklärt. Es ist wichtig die Prozesse der Atmosphäre besser zu verstehen. So könnten zum Beispiel genauere Aussagen über derzeitige Klimaveränderungen und ihren Ursprung gemacht werden. Besonders die mittlere Atmosphäre, in der ein Großteil der energiereichen Sonnenstrahlung absorbiert wird, reagiert sehr stark auf Schwankungen der Solareinstrahlung. Veränderungen der Ozonschicht durch anthropogene Einflüsse schlagen sich schnell in der Temperatur der mittleren Atmosphäre nieder. Es ist daher sehr wichtig, auch diesen auf Grund der Höhe messtechnisch schwer zugänglichen Teil mehr zu erforschen.

Mit Lidarsystemen ist es unter anderem möglich ein durchgängiges, gut aufgelöstes Temperaturprofil bis zu einer Höhe von 105 km zu erstellen. Lidar ist die Abkürzung für "Light Detection and Ranging". Damit gibt der Name schon einen Aufschluss über das Messprinzip von Lidars. Das System basiert auf der Detektion und Auswertung von zuvor ausgesendeten und in der Atmosphäre an Luftmolekülen und Aerosolen zurückgestreutem Licht. Die Intensität des empfangenen Signals gibt unter anderem Aufschluss über die Temperatur im jeweiligen Höhenbereich (vgl. Abschnitt 2.1.). Um ein durchgängiges Temperaturprofil zu erhalten, sind zwei sich ergänzende Systeme notwendig: ein Rayleigh-Mie-Raman-Lidar (im Folgenden RMR-Lidar) und ein Metallresonanzlidar (siehe Anhang). Während mit dem RMR-Lidar bei Dunkelheit bis zu einer Höhe von 90 km gemessen werden kann, ist es mit dem Metallresonanzlidar möglich im Höhenbereich von 80 bis 105 km zu messen.

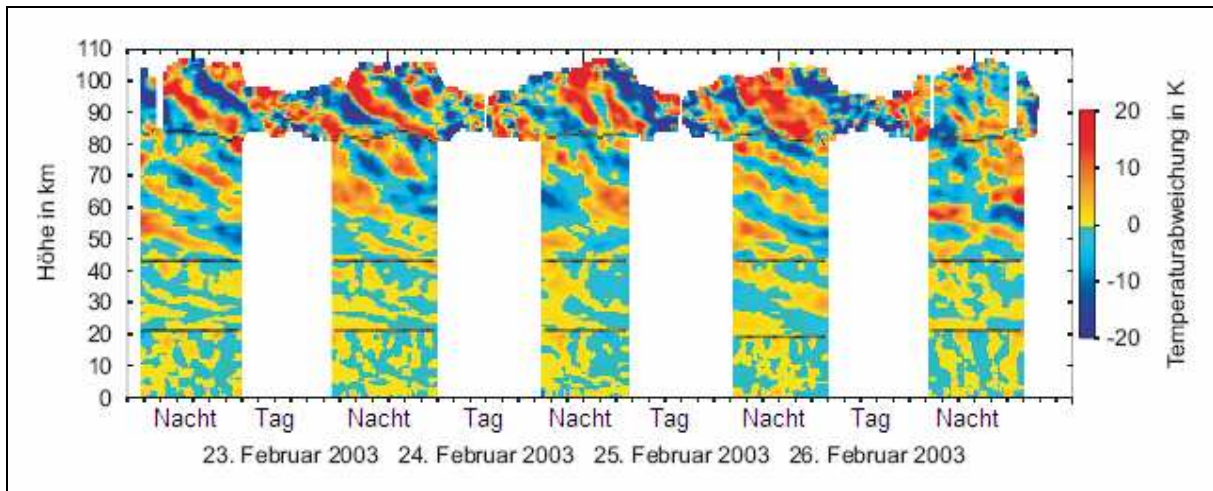


Abb. 1.2.: Temperaturmessungen über mehrere Tage. Zusammengesetzte Messungen von Metallresonanzlidar (ab ca. 80 km) und RMR-Lidar (bis ca. 80 km). Am Tag konnte mit dem Metallresonanzlidar, aber nicht mit dem RMR-Lidar gemessen werden. Nur in den Nächten konnte ein durchgängiges Temperaturprofil erstellt werden.

Derzeit kann mit diesen beiden Systemen nur für Messungen bei Nacht ein durchgängiges Temperaturprofil erstellt werden (vgl. Abb. 1.2.). Von den Lidars wird auch jede Hintergrundhelligkeit detektiert, also auch das Sonnenlicht. Dieses starke Untergrundsignal stört und überdeckt das schwache Messsignal. Durch die Sonneneinstrahlung ist am Tag der Untergrund um mindestens sechs Größenordnungen stärker als bei Nacht [vgl. z.B. Hübner, 1998]. Selbst nach Abzug des Untergrundes stört das verbleibende statistische Rauschen das Messsignal erheblich. Im Sommer bieten sogar die Nächte oft nur vier Stunden für Messungen ausreichende Dunkelheit. Genauere Atmosphärenforschungen bedürfen allerdings eines kontinuierlich gemessenen Temperaturprofils. Das Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik (im Folgenden IAP) versucht nun, durch entsprechende Maßnahmen mit beiden Systemen auch am Tag zu messen. So soll es bald möglich sein kontinuierlich Temperaturprofile bis zu 105 km Höhe zu erstellen. Das wäre weltweit einmalig und würde die Untersuchung atmosphärischer Phänomene, wie beispielsweise thermischer Gezeiten¹, vorantreiben.

Am IAP ist es seit August 2002 möglich mit dem Metallresonanzlidar (Kaliumlidar) und mit dem RMR-Lidar Routinemessungen bei klaren Nächten durchzuführen [Alpers et al., 2004].

Mit dem Metallresonanzlidar können nach Einbau eines Tageslichtfilters schon seit mehreren Jahren Messungen am Tag durchgeführt werden. Auch beim RMR-Lidar wurden entsprechende Maßnahmen getroffen, um den Untergrund genügend zu unterdrücken. Auf

¹ Gezeiten sind wichtige Wellenphänomene der Stratosphäre und der Mesosphäre. Thermische Schwankungen, die sich im Tagesverlauf fortbewegen. Daher erfordert ihre Untersuchung kontinuierliche Messungen. Sie sind Auslöser weiterer dynamischer Atmosphärenprozesse.

die verschiedenen Techniken zur Untergrundunterdrückung wird in Abschnitt 2.5.1. noch einmal eingegangen. Im Sommer 2009 wurde das tageslichtfähige RMR-Lidar erstmalig eingesetzt [Institutsbericht, 2010].

Je stärker der Untergrund, desto geringer die maximal mögliche Messhöhe. Das RMR-Lidar erreicht am Tag noch nicht die Höhe des Messbereichs des schon tageslichtfähigen Metallresonanzlidars. Der Untergrund muss beim RMR-System noch weiter unterdrückt werden, um den Messbereich am Tag auf den Messbereich bei Nacht auszuweiten. Mit einem Polarisationsfilter könnte die lineare Polarisation des Lasers ausgenutzt werden, um den Untergrund noch weiter zu reduzieren. Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Einbau eines solchen Polarisators geplant und verwirklicht. Des Weiteren konnten Abschätzungen über die Wirksamkeit des neuen Aufbaus getroffen werden. Das zweite Kapitel soll einen kurzen Überblick über die Grundlagen der Lidarmessung, insbesondere der Temperaturmessung mit dem tageslichtfähigen RMR-Lidar des IAP, geben. Außerdem wird in diesem Kapitel näher auf die Eigenschaften des zu filternden Untergrundes eingegangen. Das dritte Kapitel beschäftigt sich mit der Konzipierung und Umsetzung des gesamten Polarisationsaufbaus. Danach werden im vierten Kapitel die Atmosphärenmessungen, die mit dem neuen Polarisationsaufbau gemacht wurden, beschrieben und ausgewertet. Mit Hilfe dieser Messungen kann eine Abschätzung über den Nutzen des Polarisators getroffen werden.

2. Grundlagen der Temperaturmessung mit Lidars

In diesem Kapitel sollen die Eigenschaften und Auswirkungen des Untergrunds näher erläutert werden. Außerdem wird auf die Grundlagen der Lidar-Temperaturberechnung und den Aufbau des tageslichtfähigen RMR-Lidars eingegangen.

2.1. Grundgleichungen atmosphärischer Prozesse

Mit Lidars ist es möglich Temperaturprofile über bestimmte Höhenbereiche der Atmosphäre zu erstellen. Die Atmosphäre dehnt sich wie jeder Körper bei Erwärmung aus, dabei kommt es zu einer Abnahme der Dichte. Somit kann nach Initialisierung eines Startwertes aus der Messung der höhenaufgelösten Teilchendichte ein höhenaufgelöstes Temperaturprofil erstellt werden. Der Aufbau dieses Kapitels ist an das Kapitel 2.3. aus Holste 2007 angelehnt.

Die Atmosphäre kann als ein ideales Gas betrachtet werden. Somit gilt die ideale Gasgleichung. Alle Gleichungen beziehen sich auf das gleiche Volumen.

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad \text{oder} \quad p \cdot V = N \cdot k_B \cdot T \quad (2.1.)$$

Des Weiteren nehmen die Dichte der Luft, also damit auch die Teilchenzahl und der Druck exponentiell mit zunehmender Höhe ab. Diese Beziehung kann mit der hydrostatischen Grundgleichung beschrieben werden. Die Fallbeschleunigung wird mit g bezeichnet.

$$dp = -g(z) \cdot \rho(z) \cdot dz \quad \text{bzw.} \quad p_0 - p(z) = \int_{z_0}^z \rho(z) \cdot g \cdot dz \quad (2.2.)$$

Mit Hilfe dieser Gleichung kann nach der Initialisierung eines Startwertes z_0 (höchste Höhe) und durch Integration von oben nach unten, ein Dichteprofil der Atmosphäre erstellt werden.

Durch die Kombination der Gleichungen 2.1. und 2.2. kann nun unter Einbeziehung der mittleren Molekülmasse von Luft ($\bar{m} = \frac{\rho}{n}$) eine Beziehung zwischen der Temperatur und der Höhe hergestellt werden.

$$T(z) = \frac{1}{n(z)} \cdot \left(n_0 \cdot T_0 - \frac{\bar{m}}{k_B} \int_{z_0}^z n(z) \cdot g(z) \cdot dz \right) \quad (2.3.)$$

Allerdings ist, wie schon erwähnt, ein bekannter Startwert für die weitere Integration nötig. Dieser Startwert für die höchste Messhöhe kann für das RMR-Lidar entweder einer Referenzatmosphäre oder den zeitgleichen Temperaturmessungen des Metallresonanzlidars entnommen werden. Hierfür muss das RMR-Lidar allerdings den Messbereich des Metallresonanzlidars erreichen. Dieser liegt im Winter zwischen 80 und 105 km [von Zahn und Höffner, 1996]. Im Sommer ist die Metallschicht und damit auch der Messbereich des Kaliumlidars schmaler [Eska et al., 1998] (siehe Anhang). Hier kann erst ab einer Höhe von 85 km gemessen werden.

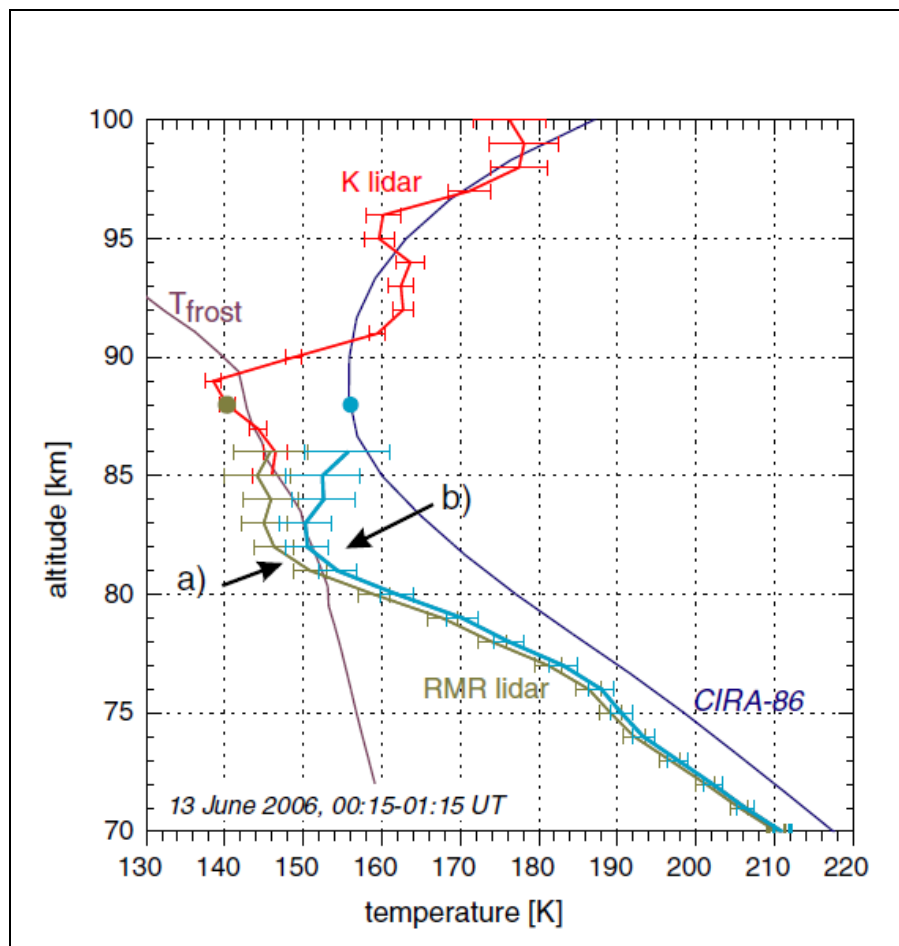


Abb. 2.1.: a) Beobachtetes, zusammengesetztes Temperaturprofil eines K-Lidar (rot) und eines RMR-Lidar (olivgrün), als Starttemperatur für das Temperaturprofil des RMR-Lidars wurde die bei dieser Höhe vom Kaliumlidar gemessene Temperatur verwendet. b) Für das hellblaue Temperaturprofil wurde die Starttemperatur der Referenzatmosphäre CIRA-86 entnommen [Messdiagramm: Gerding et al., 2007].

In Abb. 2.1. ist deutlich zu erkennen, dass das Temperaturprofil der Referenzatmosphäre CIRA-86 deutlich von dem mit den Lidars gemessenen, zusammengesetzten Temperaturprofil abweicht. Um deutlich zu machen, welche Fehler bei der Verwendung der Referenzatmosphäre als Startwert entstehen, sind in der Abbildung die verschiedenen RMR-Lidar Temperaturverläufe bei Verwendung unterschiedlicher Startwerte dargestellt. Das olivgrüne Temperaturprofil wurde mit dem Startwert der zeitgleich aufgenommenen Metallresonanzlidarmessung erstellt. Das hellblaue Temperaturprofil nutzt die Referenzatmosphäre CIRA-86² als Startwert. Dieser Kurvenverlauf ermöglicht kein stetiges Temperaturprofil durch Kombination mit den Messungen des Metallresonanzlidars. Durch Nutzung der Referenzatmosphäre als Startwert können kurzfristige Temperaturschwankungen nicht berücksichtigt werden. Die Temperaturberechnung wird falsch initialisiert und das sich ergebende Temperaturprofil wird verfälscht. Bei 86 km liegt der Unterschied der Temperaturprofile a) und b) bei 11 K [Gerding et al., 2007]. Diese Differenz verringert sich mit abnehmender Höhe. Doch erst nach mehreren Kilometern kann diese Differenz mit dem statistischen Messfehler abgedeckt werden. Es ist daher erstrebenswert, die Messhöhe des RMR-Lidars für Tageslichtmessungen auszuweiten, um bei den Temperaturberechnung den Startwert aus den zeitgleichen Messungen des Metallresonanzlidars verwenden zu können.

2.2. Lidargleichung

Mit Hilfe der folgenden Lidargleichung kann das vom Lidarsystem detektierte Signal interpretiert werden.

$$I(\lambda, z) = I_0(\lambda) \cdot \eta(\lambda) \cdot \frac{A}{4\pi \cdot z^2} \cdot F(z) \cdot T^2(\lambda, z) \cdot \Delta z \cdot \beta(\lambda, z) + U \quad (2.4.)$$

$I(\lambda, z)$ Intensität des vom Lidar empfangenen und detektierten Signals in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ und der Höhe z

² Die CIRA-86 (COSPAR International Reference Atmosphere) ist ein Modell zur Beschreibung der atmosphärischen Parameter, wie der Temperatur und zonaler Winde. Sie beschreibt klimatologische Erwartungswerte für einen bestimmten Ort.

$I_0(\lambda)$	Intensität der vom Laser ausgesendeten Pulse
$\eta(\lambda)$	Gerätekonstante, Wirkungsgrad des Empfangszweiges, Einbeziehung der Verluste an optischen Oberflächen sowie der Detektorempfindlichkeit
$\frac{A}{4\pi \cdot z^2}$	Einbeziehung des Raumwinkels zwischen dem Streuzentrum und der Fläche des Empfangsteleskops A. Die Intensität des vom Teleskop aufgefangenen Lichts nimmt demnach quadratisch mit der Höhe des Streuzentrums ab.
$F(z)$	Systemkonstante, Funktion zur Beschreibung der geometrischen Überlappung zwischen Laserstrahl und Gesichtsfeld des Empfangsteleskops
$T^2(\lambda, z)$	Transmission in der Atmosphäre. Das Licht wird durch Streuung an weiteren Teilchen und durch Absorption geschwächt. Da das Licht die Strecke zweimal zurücklegt, geht dieser Term quadratisch ein. Bei inelastischer Streuung muss die Transmission des ausgesendeten und des zurückgestreuten Lichts getrennt für die jeweiligen Wellenlängen betrachtet werden.
Δz	betrachtetes Höhenintervall
$\beta(\lambda, z)$	Gesamtvolumenrückstreukoeffizient, Summe der einzelnen Rückstreukoeffizienten der verschiedenen Streuprozesse, vgl. Abschnitt 2.3.
U	höhenunabhängiger Signaluntergrund, vgl. Abschnitt 2.5.1.

2.3. Streuprozesse in der Atmosphäre

Lange beschäftigte die Wissenschaftler die Frage nach den Gründen für das Farbspiel des Himmels. Das Himmelsblau, der rote Sonnenuntergang und die weiße Farbe der Wolken sind mit den Wechselwirkungen des Sonnenlichts mit Luftmolekülen und anderen Partikeln zu erklären. Sie haben ihren Ursprung in den verschiedenen Streuprozessen des Sonnenlichts beim Durchleuchten der Atmosphäre. Das von der Sonne ausgesendete Licht trifft nur in den seltensten Fällen auf direktem Wege auf die Erde. Es wird an den unterschiedlichen Bestandteilen der Atmosphäre gestreut. Auf diesen Streuprozessen basiert auch das Prinzip des Lidars.

Die Einteilung erfolgt nach der Größe der streuenden Teilchen, nach energetischen Vorgängen während des Streuprozesses und daraus folgenden Änderungen der Eigenschaften der Welle während des Streuprozesses. Es wird zum Beispiel zwischen elastischen und inelastischen Streuprozessen unterschieden. Beim elastischen Streuprozess ändern sich der Zustand des streuenden Teilchens und die Eigenschaften der Welle nicht, wohingegen es beim inelastischen Streuprozess zu einer teilweisen Energieumwandlung kommt und sich somit die Wellenlänge des Lichts ändert.

Der Rückstreuquerschnitt sagt etwas über den Streuwinkel und die Wahrscheinlichkeit aus, mit der es zu einem Streuprozess kommt. Somit ist der Rückstreuquerschnitt im Bezug auf das Lidarsystem auch ein Maß für die Effektivität des angewandten Streumechanismus. Zusammen mit der Anzahl der streuenden Teilchen bestimmt er die Intensität des beim Detektor ankommenden Lichts. Auf Grund ihrer Eigenschaften haben die einzelnen Streumechanismen unterschiedliche Rückstreuquerschnitte. Der gesamte Rückstreuquerschnitt setzt sich aus der Summe der Rückstreuquerschnitte aller elastischen Streuprozesse - Rayleigh-, Aerosol- und Resonanzstreuung - und der inelastischen Ramanstreuung zusammen:

$$\beta_{ges} = \underbrace{\beta_{Rayleigh} + \beta_{Aerosol} + \beta_{Resonanz}}_{\beta_{elastisch}} + \underbrace{\beta_{Raman}}_{\beta_{inelastisch}} \quad (2.5.)$$

Rayleighstreuung

Die Rayleighstreuung tritt an Partikeln auf, deren Durchmesser klein gegenüber der ausgesendeten Wellenlänge ist. In der Atmosphäre sind vor allem die Luftmoleküle die Streuzentren dieses Prozesses. Bei Lidarmessungen nutzt man diesen Streumechanismus zur Temperaturbestimmung zwischen 30 und 90 km. Unterhalb wird das Signal durch Dunst und Wasserdampf in der Atmosphäre zu sehr verfälscht. Erst ab einer Höhe von 30 km ist der Aerosolanteil vernachlässigbar [Hübner, 1998]. Da die Dichte der Atmosphäre und damit das Rayleighsignal exponentiell mit der Höhe abnimmt, ist mit den heutigen Lidars oberhalb von 90 km keine Messung mehr möglich. Dieser Streuprozess ist ein elastischer Streuprozess. Der Rückstreuquerschnitt der Rayleighstreuung ist umgekehrt proportional zur vierten Potenz der Wellenlänge. Damit ist dieser Streuprozess für kurzwellige Strahlung besonders effektiv. Diese Abhängigkeit hat auch zur Folge, dass blaues Licht stärker als rotes gestreut wird und begründet die blaue Farbe des Himmels und den roten Sonnenuntergang. Die Rayleighstreuung führt auch zur Polarisierung des Himmelslichts, wie in Abschnitt 2.5.2. näher erläutert wird. Nähert sich die Größe der streuenden Teilchen der Wellenlänge an, geht die Rayleighstreuung in Aerosolstreuung über.

Aerosolstreuung

Aerosole befinden sich in Form von Dunst (z. B.: Pollen oder Rußpartikel) oder Wassertröpfchen (Wolken oder Nebel) in der Atmosphäre. Der Durchmesser dieser Teilchen kann in der Regel nicht mehr als klein im Vergleich zur Wellenlänge betrachtet werden. Je mehr sich die Teilchengröße der Wellenlänge annähert, desto mehr ähnelt die Aerosolstreuung der Rayleighstreuung. Auch Aerosolstreuung gehört zu den elastischen Streuprozessen. Bei diesem Streuprozess kommt es auf Grund der Größe zu Reflexionen und Mehrfachstreuung innerhalb des Partikels. Das Licht wird nahezu wellenlängenunabhängig diffus gestreut, daher erscheinen die Wolken (große Wassertröpfchen) weiß. Ein Spezialfall der Aerosolstreuung ist die Miestreuung, bei der die Streuteilchen eine sphärische Form aufweisen. Bei auf Rayleighstreuung basierenden Temperaturbestimmungen mittels Lidar wirkt sich Aerosolstreuung störend aus.

Bei Aerosolstreuung findet je nach Partikelgröße eine Depolarisation der elektromagnetischen Welle statt. "Werden die Teilchen größer [als 100 μm], so wächst schnell der Betrag des unpolarisierten Lichts bei 90° und das Polarisationsmaximum rückt nach vorne, bei der Teilchengröße 160 und 180 μm liegt es bei 110° und 120°." [Gustav-Mie, 1908]. Man nutzt diese Eigenschaften, um Informationen über die Aerosole selbst zu erhalten. Dieser Streuprozess dient auch der Beobachtung und Untersuchung leuchtender Nachtwolken (engl. noctilucent clouds - NLC). Nähere Informationen zu leuchtenden Nachtwolken sind im Anhang zu finden.

Resonanzstreuung

Bei der Resonanzstreuung werden freie Atome mit einer Frequenz angeregt, die für einen Elektronenübergang dieses Atoms notwendig ist. Somit springt ein Elektron beim Auftreffen der Welle auf ein höheres Energieniveau. Relaxiert das Elektron nun wieder in seinen Grundzustand zurück, sendet es seinerseits wieder eine Welle der gleichen Wellenlänge aus. Der Rückstreuquerschnitt ist je nach angeregtem Atom oder Molekül um bis zu 10^{15} Mal größer als bei Rayleighstreuung. Daher sind mit diesem Streuprozess durch Detektion von Spurengasen auch Lidarmessungen in großen Höhen möglich. Zwischen 80 und 105 km sind nach dem Verglühen von Meteoriden Spuren von Metallen vorhanden, die mit ihrer Resonanzfrequenz angeregt werden können. In dieser Höhe kann demnach die Resonanzstreuung zur Temperaturbestimmung mit dem Metallresonanzlidar ausgenutzt werden.

Ramanstreuung

Die Ramanstreuung gehört zu den inelastischen Streuprozessen. Man kann zwischen Rotationsraman- und Vibrationsramanstreuung unterscheiden. Das durch die auftreffende elektromagnetische Welle angeregte Elektron des Atoms relaxiert also nicht wieder auf sein Ausgangsenergieniveau zurück. Somit ändert sich beim Streuprozess die Wellenlänge des Lichts. Bei der Temperaturbestimmung mittels Lidar nutzt man die Ramanstreuung, um auch den von der Aerosolstreuung gestörten unteren Bereich der Atmosphäre abdecken zu können. Hierfür nutzt man die Tatsache, dass sich die Wellenlänge bei diesem inelastischen Prozess ändert. So können gezielt nur Sauerstoff- und Stickstoffatome betrachtet werden, indem man die bekannten, reemittierten Wellenlängen detektiert. Die Verschiebung der Wellenlänge liegt im Bereich weniger Nanometer. Zum Beispiel erhöht sich durch (Vibrations-) Ramanstreuung an Stickstoffmolekülen die Wellenlänge von 532 nm auf 608 nm. Der Rückstreuquerschnitt dieses Streuprozesses ist ca. 1000 Mal kleiner als bei elastischen Streuprozessen. Daher kann er nur bis zu einer Höhe von ca. 30 km genutzt werden.

2.4. Das Rayleigh-Mie-Raman-Lidar des IAP

Die Angaben des folgenden Abschnitts beziehen sich auf das tageslichtfähige RMR-Lidar des IAP. Der Name des Rayleigh-Mie-Raman-Lidar gibt Aufschluss über die genutzten Streuprozesse. Um mit dem Lidar die Streuprozesse zu detektieren und damit einen Aufschluss über die höhenabhängige Teilchendichte geben zu können, wird das in Abbildung 2.2. verdeutlichte Prinzip genutzt.

Die Sendeeinheit des RMR-Lidars bildet ein Nd:YAG-Laser. Der Laser wird durch Blitzlampen und eine Güteschaltung gepumpt und gepulst. Außerdem wird der Laser geseedet, das heißt durch einen anderen, optisch sehr schmalbandigen Laser gespeist. So läuft der Nd:YAG-Laser als Singlemodelaser auf einer exakten Wellenlänge. Dieser Aufbau ermöglicht kurze und spektral schmalbandige Laserpulse mit einer hohen Energiedichte. Der Laser besitzt eine Pulsrate von 30 Hz. Er arbeitet bei einer Wellenlänge von 1064 nm. Durch Frequenzverdopplung und -verdreifachung strahlt er jedoch auch bei den ersten beiden Harmonischen, bei 532 nm und 355 nm ab. Licht ist daher im Zusammenhang mit der Lidarmessung nicht nur auf den sichtbaren Bereich beschränkt zu verstehen. Bei der

Temperaturbestimmung finden nur die erste und zweite Harmonische Verwendung. Der Empfangszweig des tageslichtfähigen RMR-Lidars ist allerdings nur für die Auswertung der bei 532 nm ausgesendeten und zurückempfungenen Signale ausgelegt.

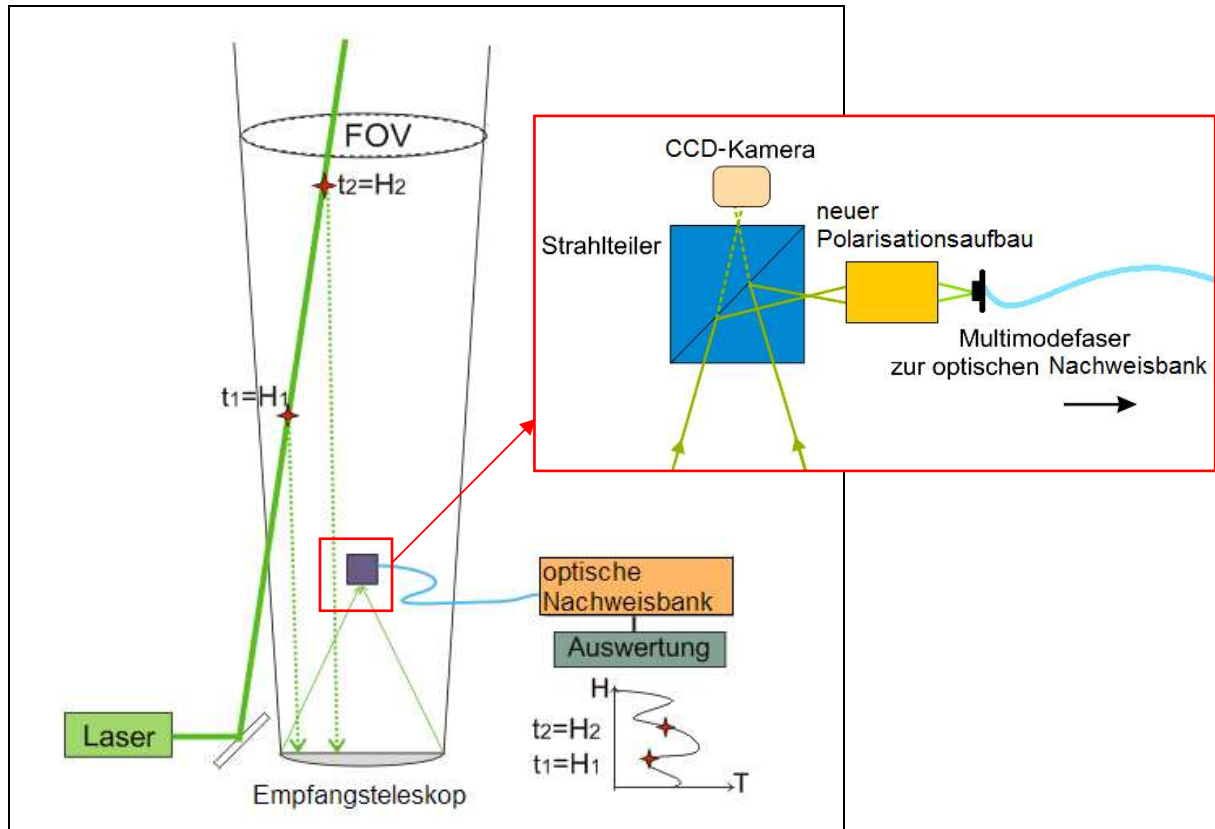


Abb. 2.2.: Schematischer Aufbau des tageslichtfähigen RMR-Lidars. Der Laserstrahl wird über Umlenkspiegel in die Atmosphäre gelenkt und wird in der Atmosphäre an Teilchen gestreut. Innerhalb des FOV gestreutes Licht trifft auf das Empfangsteleskop. Das Licht wird fokussiert und zur optischen Nachweisbank geleitet. Der Bereich des violetten Quadrates ist rechts noch einmal vergrößert dargestellt.

Der Laserstrahl wird über piezogesteuerte Umlenkspiegel Richtung Atmosphäre gelenkt. Vor dem Aussenden des Laserstrahls wird der Durchmesser von 9 mm auf 9 cm mit einem Aufweitungsteleskop vergrößert. Das vom Laser ausgesandte Licht wird in der Atmosphäre an Molekülen und Teilchen in verschiedenen Höhen und demnach nach verschiedenen Laufzeiten gestreut. Das Field of View (zu dt. Gesichtsfeld, kurz: FOV), ist eine technische Größe des Empfangsteleskops. Es beschreibt das Atmosphärenvolumen innerhalb dessen streuende Teilchen vom Empfangsteleskop erfasst werden können. Die Angabe des Gesichtsfelds erfolgt über dessen Divergenzwinkel in μrad . Nur wenn sich das Streuzentrum innerhalb des FOV befindet, trifft das zurückgestreute Licht nach einer Laufzeit von $2 \cdot t$ auf das Empfangsteleskop. Mit Hilfe dieser Laufzeitunterschiede kann durch die spätere Auswertung ein höhenabhängiges Dichte- und Temperaturprofil erstellt werden.

Das Herzstück des Empfangsteleskops ist ein Parabolspiegel mit einem Durchmesser von 80 cm und einer Brennweite von 320 cm. Damit wird das einfallende Streulicht fokussiert. Wie im vergrößerten Teil der Abbildung 2.2. dargestellt, wird der Strahl nun geteilt. Ein geringer Teil des Lichts wird für die folgende Strahlstabilisierung auf eine CCD-Kamera transmittiert. Der Laserstrahl kann sich durch atmosphärische Turbulenzen aus dem Gesichtsfeld des Teleskops bewegen. Besonders in den unteren Luftschichten sorgen Winde und Temperaturunterschiede der einzelnen Schichten für Änderungen der Brechzahl. Dieses Phänomen, auch Seeing genannt, ist auch beim Anblick der flimmernden Lichter einer entfernten Stadt zu beobachten. Es lenkt den Laserstrahl ab und verringert den geometrischen Überlapp mit dem Gesichtsfeld. Daher sorgt beim tageslichtfähigen RMR-Lidar eine schnelle Strahlstabilisierung für eine Reduzierung der Laserstrahlschwankungen auf maximal 5 μ rad. Mit der CCD-Kamera wird der Strahl beobachtet, damit kleinere Schwankungen vor dem nächsten Laserpuls, mit Hilfe der piezogesteuerten Umlenkspiegel, ausgeglichen werden können.

90 % des Lichts werden reflektiert und durchlaufen nun den neuen Polarisationsaufbau, auf den in Abschnitt 3 näher eingegangen wird. Nun wird der Strahl in die 200 μ m dünne Multimodefaser fokussiert. Diese leitet die Photonen zur optischen Nachweisbank (vgl. Abb. 2.3.).

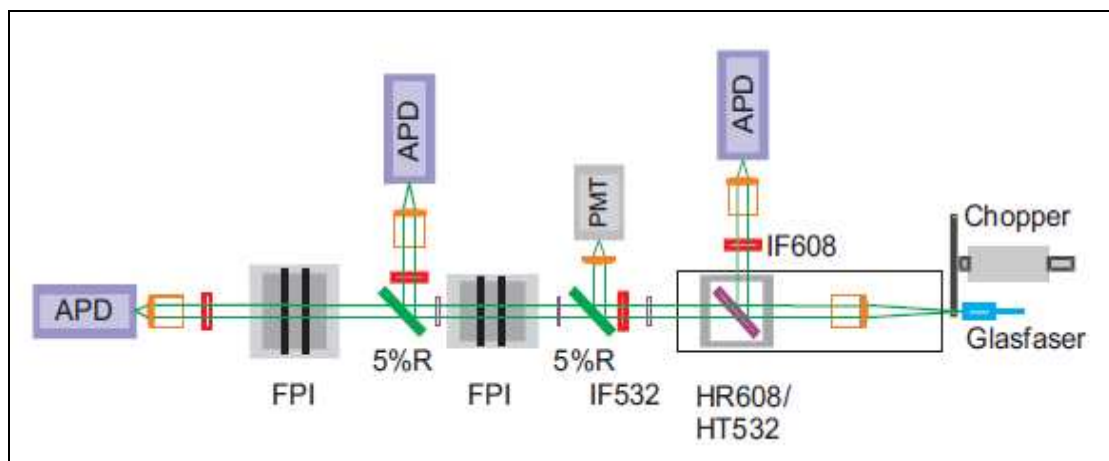


Abb. 2.3.: Schematischer Aufbau des Nachweiszweiges des tageslichtfähigen RMR-Lidars am IAP. Das Licht wird von rechts über die Glasfaser aus der Teleskophalle eingeleitet. Ein Chopper dient der Reduzierung des Signals aus den unteren Schichten. Die hochempfindlichen Detektoren (APDs: Avalanche Photodiode, PMT: Photomultiplier Tube) registrieren die ankommenden Photonen. Rot dargestellt: die verschiedenen Interferenzfilter. Das erste violette und die beiden grünen Teile verdeutlichen Strahlteiler. Linsen werden orange dargestellt. Des Weiteren sind zwei Fabry-Perot-Etalons (FPI) zu sehen [Abb.: Institutsbericht, 2010].

Im Nachweiszweig trifft der Strahl auf einen Chopper, ein sich drehendes Flügelrad. Der Chopper ist in Abstimmung mit den ausgesendeten Laserpulsen so eingestellt, dass das

Signal der unteren Atmosphärensicht geblockt wird. Da sich in der Troposphäre viele streuende Teilchen befinden und das Licht nur einen kurzen Laufweg hat, ist dieses Signal sehr stark und würde die nachfolgenden Detektoren unnötig belasten. Der mit einer Sammellinse parallelisierte Strahl wird nun mit einem dichroitischen Spiegel (wellenlängenabhängigen Strahlteiler) getrennt. Hier erfährt der Strahl eine erste Unterteilung in verschiedene Wellenlängenbereiche. Zur Temperaturbestimmung ist der geradeaus durchgehende Strahl wichtig. Dieser Zweig dient der Bestimmung des in der Atmosphäre elastisch gestreuten Lichtanteils. Die Interferenzfilter und die Fabry-Perot-Interferometer dienen der spektralen Filterung des ankommenden Signals (vgl. Abschnitt 2.5.1.). Eine Avalanche Photodiode (dt. Lawinenfotodiode) detektiert nun die einzelnen auftreffenden Photonen. Diese Photodioden sind sehr empfindlich. Das Signal eines einzelnen Photons wird verstärkt und kann detektiert werden. Eine hohe Empfindlichkeit ist sehr wichtig, da nur ein sehr geringer Teil des vom Laser ausgesendeten Lichts zurückgestreut und vom Empfangsteleskop aufgefangen wird. Das von den streuenden Teilchen der mittleren Atmosphäre zurückgestrahlte Lichtsignal ist mit einer Glühbirne mit einer Leistung von etwa 10^{-6} Watt aus der gleichen Entfernung zu vergleichen [Poster Optik 09 im IAP].

Die jeweils 5%-ig herausreflektierten Strahlzweige dienen der Kontrolle der Etalontransmission.

Der vom dichroitischen Spiegel reflektierte Strahlteil gibt Aufschluss über den Stickstoff der unteren Atmosphäre. Durch inelastische Ramanstreuung an den Stickstoffmolekülen änderte sich beim Streuvorgang die Wellenlänge auf 608 nm. Das Licht, das in diesem Nachweiszweig detektiert wird, hat nur molekulare Rückstreuung am Stickstoff erfahren. Es ist unbeeinflusst von der elastischen Aerosolstreuung. Damit dient dieser Nachweiszweig der Überprüfung und Korrektur des unterhalb von 34 km ankommenden Rayleighsignals [Gerding et al., 2008]. Der Messbereich, der mit Ramanstreuung abgedeckt werden kann, ist wegen des geringen Rückstreuquerschnitts auf diese Höhe begrenzt. Doch oberhalb dieser Höhe kann die Atmosphäre als aerosolfrei angenommen werden.

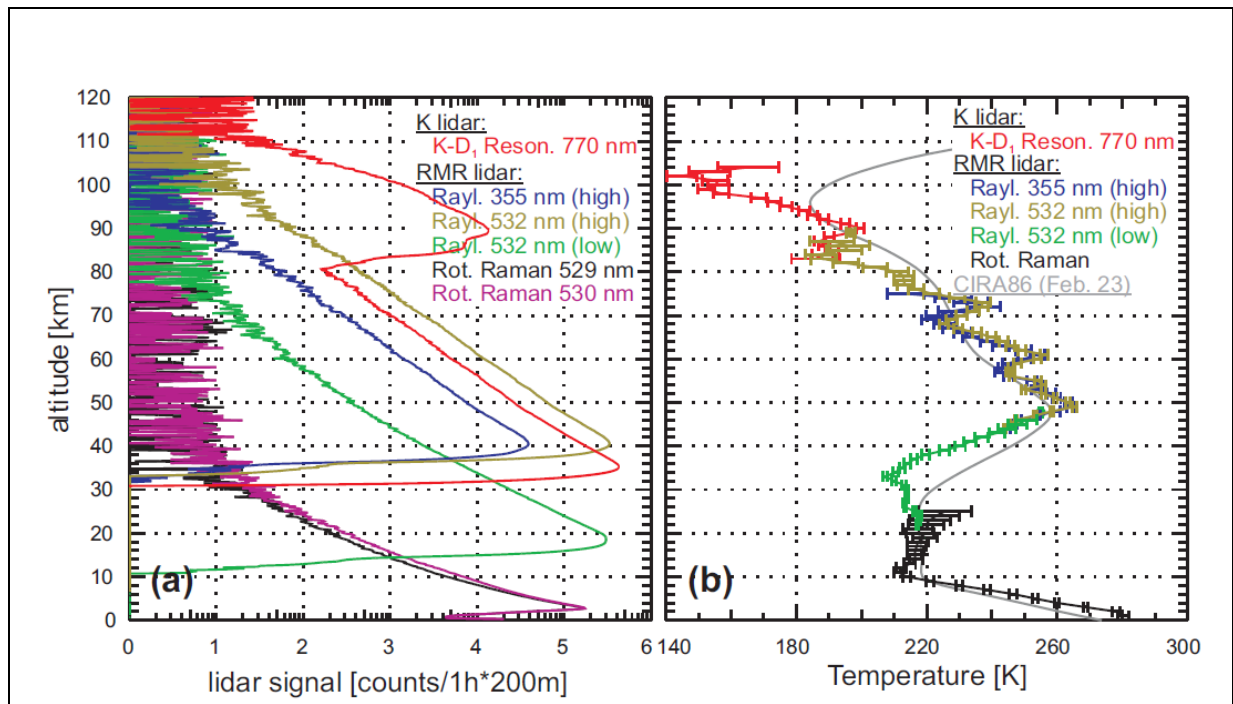


Abb. 2.4.: Beispiel für eine nächtliche Temperaturmessung, nach Untergrundabzug (23. Februar 2003). a) zeigt die verschiedenen Rückstreuprofile der einzelnen Empfangskanäle (stimmen nicht mit dem neuen tageslichtfähigen Nachweisweig überein). b) aus den in a) dargestellten Rohdaten ermitteltes zusammengesetztes Temperaturprofil [Messdiagramm: Alpers et al., 2004]

Jeder Streuprozess deckt auf Grund seiner Eigenschaften im späteren Höhenprofil einen bestimmten Bereich ab, wie in Abbildung 2.4. zu sehen ist. Die einzelnen zurückgestreuten Photonen werden in der Nachweisbank wellenlängenabhängig, das heißt nach elastischer und inelastischer Streuung getrennt. So kann das Signal einzeln für jeden Streuprozess detektiert werden. Durch die Verknüpfung dieser so gewonnen Signale kann ein Temperaturprofil mit geringen Fehlern erstellt werden. Das Tageslichtfähige RMR-Lidar hat bis jetzt einen Nachweisweig für das gesamte Rayleighsignal bei 532 nm und einen Nachweisweig zur Detektion des an Stickstoffmolekülen (vibrations-) ramangestreuten Laserlichts. Zur genaueren Temperaturauflösung sollen weitere Nachweisweige folgen.

Die Auswertung der Daten des Tag-Lidars erfolgt in einer anderen Höhenauflösung als beim Nacht-Lidar. Das ankommende Signal wird vom Nachtsystem in der Einheit Photonen/200m/4000Laserpulse und vom Tagsystem in Photonen/195m/1000Laserpulse ermittelt. Um die Angaben der gezählten Photonen vergleichbarer zu machen, werden im Folgenden die Photonenzählraten auf die Einheit Photonen/km/h normiert. Eine Stunde Integrationszeit entspricht dabei z. B. 25 Rückstreuprofilen mit 4000 Laserpulsen.

2.5. Probleme der Tageslichtmessung

Bei Lidarmessungen tritt am Tag durch die zusätzlichen Lichteinflüsse der Sonneneinstrahlung ein deutlich höheres Störsignal auf, als bei Nachtmessungen. In diesem Kapitel sollen die Auswirkungen auf die Lidarmessung, die Möglichkeiten zur Reduzierung und die Eigenschaften dieses Störsignals erläutert werden.

2.5.1. Der Signaluntergrund

Bei jeder Lidarmessung wird, neben dem zurückgestreuten Laserlicht, ein zusätzliches Signal detektiert. Die so genannte Dunkelzählrate des Detektors führt nur zu einer sehr geringen Signalerhöhung. Sie beschreibt die Anzahl des auch bei völliger Dunkelheit ebenfalls als Photonen detektierten Elektronenrauschens. Der Signaluntergrund wird zum Großteil durch Lichteinflüsse aus der Umwelt - künstliches oder natürliches Licht der Gestirne - verursacht. Diese führen zu einem zusätzlichen Photoneneinfall auf das Empfangsteleskop.

Dieses zusätzliche Signal überlagert demnach das Messsignal. Daher muss der Untergrund vom erhaltenen Signal abgezogen werden, um eine falsche Berechnung der Temperaturen zu vermeiden. Der Signaluntergrund ist höhenunabhängig und wird während der Messung kontinuierlich mitbestimmt. Zur Bestimmung des Untergrundsignals wird das Rückstreuprofil bis zu einer Höhe von 200 km erstellt, obwohl ab 120 km kein Rayleighsignal mehr zu erwarten ist. Die oberhalb von 120 km mit dem RMR-Lidar detektierten Photonen sind frei von zurückgestreutem Lasersignal. Die mittlere, oberhalb von 120 km detektierte Zählrate beschreibt nur den höhenunabhängigen Untergrund und kann daher anschließend über den gesamten Höhenbereich vom Signal abgezogen werden.

Der Untergrund kann zwar abgezogen werden, doch je stärker der Untergrund ist, desto stärker ist auch das zurückbleibende Rauschen. Dieses Rauschen tritt bei jeder statistischen Messung auf. Das Rauschen unterliegt der Poissonverteilung. Damit ergibt sich für eine Untergrundzählrate U die Standardabweichung, also das Rauschen $\sigma = \sqrt{U}$ [vgl. Holste 2007].

Selbst bei Nachtmessungen kommt es zu zusätzlichen Lichteinflüssen, etwa durch Sterne, den Mond und künstliches Licht. Jedoch beeinflusst das zurückbleibende Rauschen des nächtlichen Störlichts die Messung nicht signifikant. Bei Messungen am Tag trifft deutlich mehr Sonnenlicht als zurückgestreutes Laserlicht auf das Empfangsteleskop. Der

Signaluntergrund und das damit verbundene Rauschen sind nicht zu vernachlässigen. Je höher das Rauschen, desto kleiner die maximal erreichbare Messhöhe. Die Filterung und Unterdrückung des Untergrundes ist daher für Tagmessungen sehr viel anspruchsvoller. Auf Grund des nach Untergrundabzug verbleibenden Rauschens ist es wichtig den Untergrund schon vor dem Auftreffen auf die Detektoren zu reduzieren. Um den Untergrund zu unterdrücken, wurden am tageslichtfähigen RMR-Lidar des IAP schon einige Maßnahmen getroffen:

Kleines Sichtfeld:

Um für Tagesmessungen das auf das Empfangsteleskop einfallende Sonnenlicht gering zu halten, ist ein möglichst kleines Gesichtsfeld nötig. Für das tageslichtfähige RMR-Lidar des IAP beträgt das Gesichtsfeld zurzeit ca. $60\text{ }\mu\text{rad}$. Das bedeutet bis zu einer Höhe von 100 km nimmt der Durchmesser auf 6,8 m zu. Der Untergrund ist proportional zum Quadrat des Gesichtsfelddurchmessers. Mit der Verkleinerung des Gesichtsfelds von knapp $600\text{ }\mu\text{rad}$ auf ca. $60\text{ }\mu\text{rad}$ konnte der Untergrund etwa um den Faktor 100 reduziert werden [Gerding et al., 2010]. Doch die Reduzierung des Gesichtsfelds hat Grenzen. Das kleine Gesichtsfeld darf nicht dazu führen, dass das Strahlvolumen des Lasers nicht mehr vollständig erfasst werden kann. Die Verwendung eines solch kleinen Gesichtsfelds stellt hohe technische Anforderungen und benötigt eine sehr gute Strahlstabilisierung. Nur so ist es möglich, den Laserstrahl immer im Gesichtsfeld des Empfangsteleskop zu halten und kein Signal zu verlieren.

Spektrale Filterung:

Die spektrale Filterung sorgt dafür, dass nur Licht der gewünschten Wellenlängen auf die jeweiligen Detektoren trifft. Die Wellenlängenfilterung wird durch Interferenzfilter und Fabry-Perot-Interferometer (Etalons) erreicht. Für einen Interferenzfilter werden dünne teilreflektierende Schichten auf einem Trägerglas aufgebracht. Durch Vielstrahlinterferenz kommt es zur Ausbildung schmaler Transmissionsmaxima. Außerdem werden vom Transmissionsmaximum entfernte Wellenlängen durch dielektrische Schichten unterdrückt. Die Interferenzfilter des tageslichtfähigen RMR-Lidars reduzieren das Signal auf eine spektrale Breite von 130 pm.

Die Etalons bestehen aus zwei teilreflektierenden Spiegeln, die zusammen eine Art optischen Resonator bilden. Es kommt auch hier durch Mehrfachinterferenz zur Ausbildung

noch schmalere Transmissionsmaxima. Allerdings sind auch der spektralen Filterung Grenzen gesetzt. Der Transmissionskoeffizient sinkt bei zu schmal gewählter spektraler Bandbreite der Etalons [Holste, 2007]. Um zu große Transmissionsverluste zu vermeiden, sollte die Filterbreite nicht schmäler als die Dopplerbreite des zurückgestreuten Signals gewählt werden. Die Etalons reduzieren das Signal auf 4 pm, bei einer temperaturabhängigen Rayleighdopplerbreite von etwa 2,5 pm [vgl. Holste, 2007].

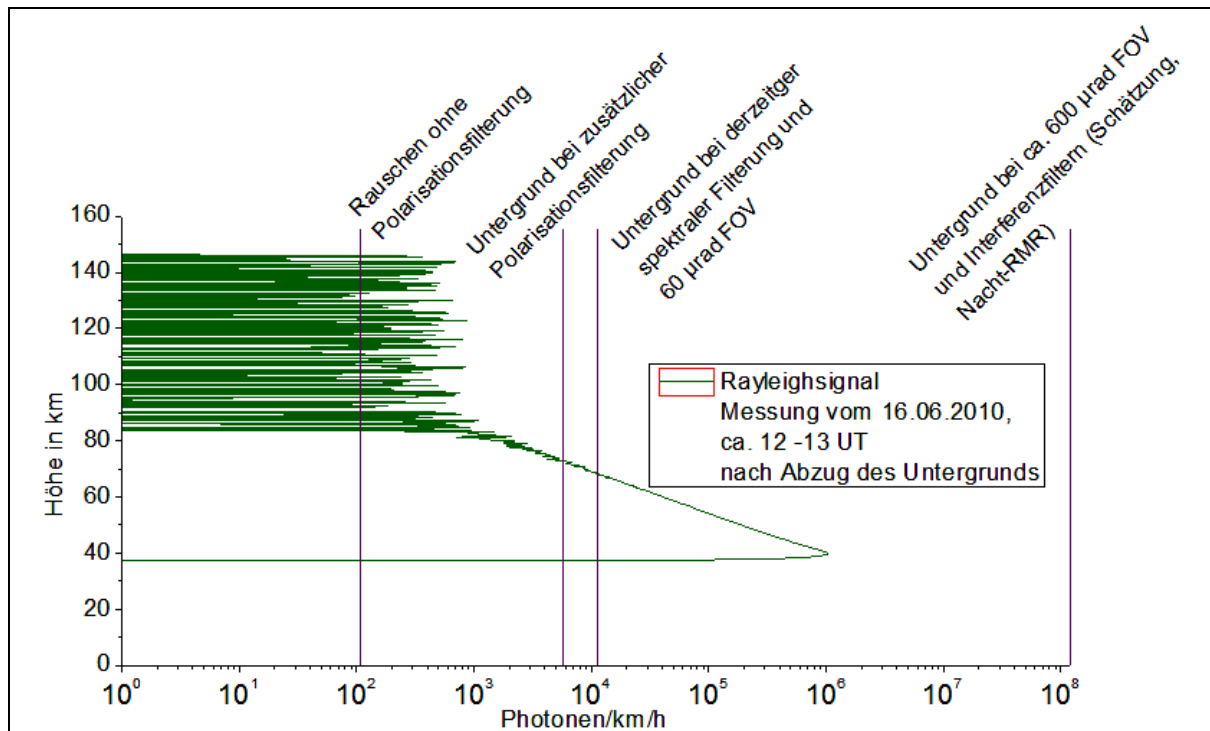


Abb. 2.5.: Messung eines Rayleighsignalprofils nach Abzug des Untergrunds am Tag. Ebenfalls eingezeichnet ist das nach Untergrundabzug verbleibende Rauschen bei Tag sowie die Auswirkungen der verschiedenen Techniken zur Untergrundunterdrückung auf die Untergrundzählrate bei Tag (violett). Beim aktuellen Untergrund und dem erwarteten Untergrund bei Verwendung des neuen Polarisationszweiges wurden Tagesmittelwerte verwendet.

Diese beiden Methoden zur Untergrundunterdrückung werden beim tageslichtfähigen RMR-Lidar des IAP bereits genutzt. Wie in Abbildung 2.5. zu sehen ist, konnte dadurch der Untergrund im Vergleich zum Nachtlidar schon erheblich reduziert werden. Durch Untergrundunterdrückung mittels kleinen Sichtfelds und der derzeitigen spektralen Filterung wurden 2009 mit dem tagslichtfähigen RMR-Lidar auch bei einer Sonnenstandshöhe von 55° im Sommer Messungen durchgeführt [Gerding et al., 2010]. Zum Vergleich: Mit dem Nacht-RMR-System konnte nur bis zur einer Sonnenstandshöhe von etwa -6° gemessen werden. Bei höherem Sonnenstand würde der einfallende Untergrund die Detektoren des Nacht-RMR-Lidar überlasten. Abbildung 2.5. zeigt auch das für diese Messung gemittelte

Rauschen von etwa 106 Photonen/km/h liegt. Bei einer Messung mit dem Nacht-RMR-Lidar wäre das Rauschen etwa zwei Größenordnungen stärker bei 10^4 Photonen/km/h.

Die Angabe des Signal-Rausch-Verhältnisses (kurz: SNR) dient als vergleichbares Maß für die Qualität des Signals. Das SNR kann wie folgt berechnet werden:

$$SNR = \frac{Signal_{min}}{\sqrt{Untergrund}} = \frac{Signal_{min}}{Rauschen} \quad (2.6.)$$

Bei Lidarmessungen hat eine bestimmte Signalqualität eine bestimmte Messhöhe zur Folge. Während einer Messnacht mit einem sehr starken Untergrund von 1250 Photonen/km/h war eine maximale Messhöhe von 90 km möglich. Das Signal aus dieser Höhe betrug 440 Photonen/km/h. Das Rauschsignal dieser Messung lag demnach bei $\sqrt{1250}$ Photonen/km/h $\approx$ 35 Photonen/km/h. Das Signal-Rausch-Verhältnis betrug also:

$$SNR = \frac{440 \text{ Photonen / km / h}}{35,4 \text{ Photonen / km / h}} = 12,4.$$

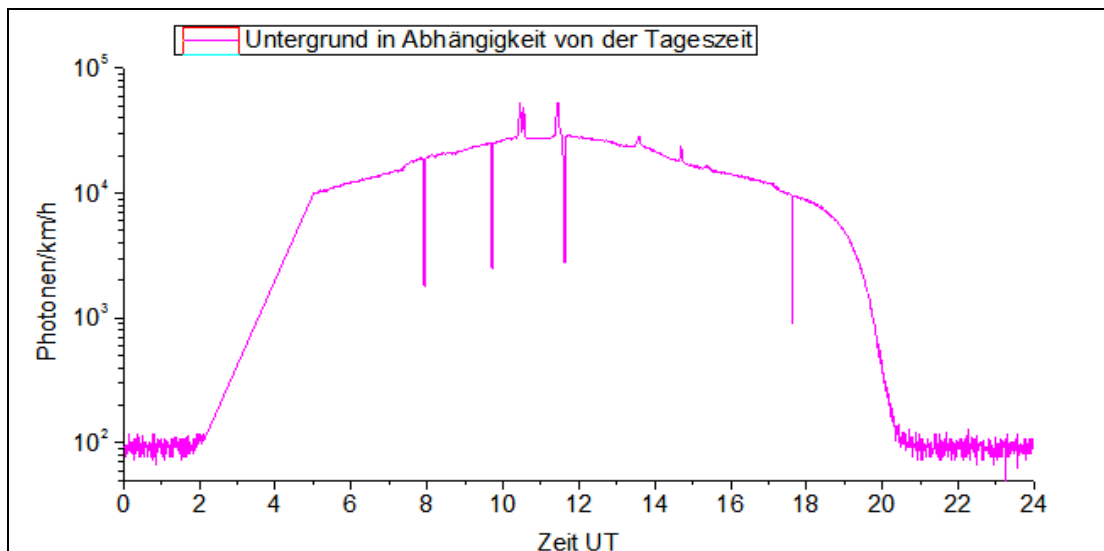


Abb. 2.6: Einer Lidarmessung vom 16.06.2010 entnommenes Untergrundsignal (Signal oberhalb von 120 km) in Abhängigkeit von der Tageszeit.

Abbildung 2.6. zeigt das Ergebnis der einer Lidarmessung entnommenen Untergrundzählrate (Zählrate oberhalb von 120 km). Diese wurde mit dem tageslichtfähigen RMR-Lidar am 16.06.2010 mit der bestehenden spektralen Filterung bei einem FOV von $60 \mu\text{rad}$ durchgeführt. Der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Polarisationszweig bestand zu diesem Zeitpunkt noch nicht. Die Messung zeigt, wie sich der Untergrund im Verlauf des Tages verhält. Kurz vor Sonnenaufgang - an diesem Sommertag 2:40 UT - steigt der

Untergrund an. Die Zeitangabe 12-13 UT bezieht sich auf die Universal time und wird als Zeitbasis für alle folgenden Messungen verwendet.

Mehrere steile Flanken nach oben und unten heben sich vom erwarteten Kurvenverlauf ab. Die nach unten gerichteten Spitzen sind auf Fehlberechnungen aus technischen Gründen zurückzuführen. Diese Werte sind unrealistisch und falsch. Die positiven Flanken entstehen, da durchziehende Wolken zu einer kurzen Untergrunderhöhung führten.

Ohne diese Umwelteinflüsse würde der Untergrund bis zur Mittagszeit gegen 12:00 UT ansteigen und danach wieder fallen. Da gegen 12:00 UT der meiste Untergrund detektiert wird, hat das tageslichtfähige RMR-Lidar zur Mittagszeit die schlechteste Signalqualität. Die Messhöhe des RMR-Lidars ist daher wenn die Sonne am höchsten steht, also zur Mittagszeit im Sommer, am stärksten begrenzt.

2.5.2. Polarisiertes Himmelslicht

Das Sonnenlicht wird beim Durchlaufen der Atmosphäre linear polarisiert. Diese Polarisation wird durch die Rayleighstreuung des Sonnenlichts an den Luftmolekülen hervorgerufen. Einige Insekten können mit ihrem Facettenauge die Polarisation des Lichts erkennen und zur Orientierung nutzen. Auch in der Fotografie nutzt man diesen Effekt, um auf Bildern die blaue Farbe des Himmels zu verstärken.

Die Moleküle der Luft wirken beim Auftreffen der elektromagnetischen Welle wie Dipole [z. B.: Hecht, 2002, S. 109 ff., 526 ff. ; Roedel, 1992, S. 22 ff.]. Strahlt nun das Sonnenlicht, also ein oszillierendes E-Feld, auf diese Dipole ein, richten sie sich parallel zum elektrischen Feld der eingestrahlten Welle aus. Die Dipolachse liegt demnach immer in der Einfallsebene der Sonne, somit sind die Dipole alle gleich ausgerichtet. Die Dipole absorbieren die Energie des ankommenden Lichts. Durch diesen Energieeinfluss beginnt der Dipol entlang der Dipolachse zu oszillieren. Diese Streck- und Stauchbewegungen lösen wiederum ein Abstrahlen der erhaltenen elektromagnetischen Welle aus. Die Dipole strahlen ihrerseits wieder Wellen der gleichen Eigenschaften, meist senkrecht zu ihrer Dipolachse, aus. Dieses Licht wird demnach auch senkrecht zur Einfallsebene der Sonne abgestrahlt und ist in Dipolrichtung polarisiert. Je energiereicher das einfallende Licht ist, desto stärker pulsiert der Dipol und desto stärker wird das Licht von seiner ursprünglichen Strahlungsrichtung abgelenkt. Daher wird energiereichere, kurzwellige Strahlung stärker gestreut. Somit ist der Polarisationsgrad des Sonnenlichts proportional zum Streuwinkel und das senkrecht zur Einfallsebene der Sonne gestreute Licht maximal polarisiert (vgl. Abb. 2.7.).

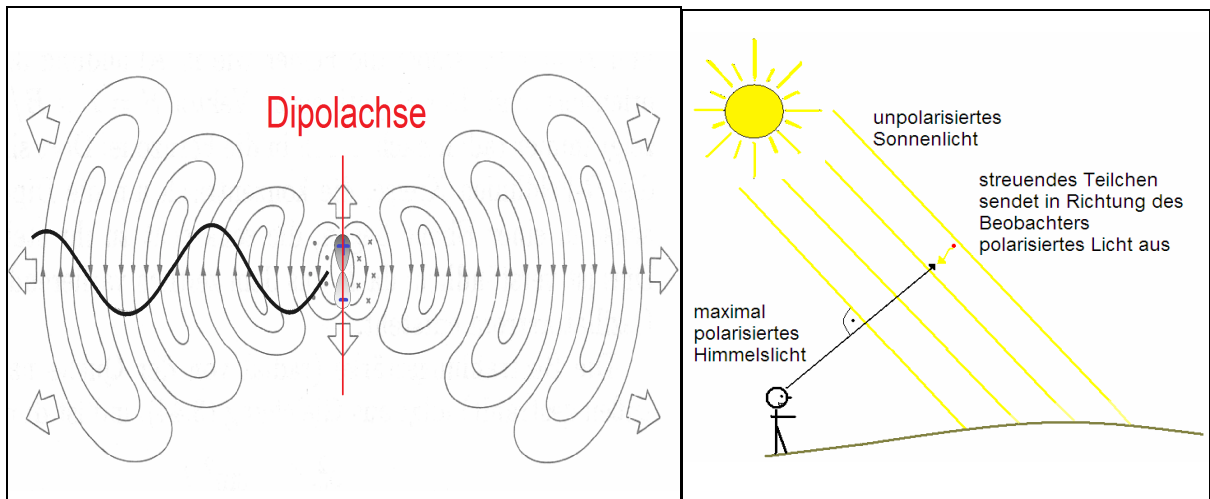


Abb. 2.7.: Streurichtung des polarisierten Sonnenlichts; links: Streuendes Dipolteilchen, der pulsierende Dipol sendet das, entlang der Dipolachse empfangene Licht senkrecht zur Dipolachse aus [Abb. Hecht S. 110]; rechts: Richtung des maximal polarisierten Himmelslichts im Bezug auf einen Beobachter

Da sich die Erde einmal täglich um ihre eigene Achse dreht, ändert sich die Position der Sonne und damit auch die Einfallsebene der Sonne um 15°h. Eine Änderung des Sonnenstandes zieht eine Änderung der Polarisationsrichtung des gestreuten Himmelslichts nach sich.

Der Polarisationsgrad des Sonnenlichtes ist im Bezug auf das Empfangsteleskop von mehreren Parametern abhängig. Zum einen vom Winkel, in dem die Sonne zum Empfangsteleskop steht und zum anderen von der Anzahl der in der Atmosphäre vorhandenen depolarisierenden Aerosolteilchen. Das Atmosphärenvolumen, das das Sonnenlicht durchstrahlt und damit verbunden auch die Depolarisation durch Mehrfachstreuung, haben nur einen sehr geringen Einfluss auf den Polarisationsgrad des Himmelslichtes.

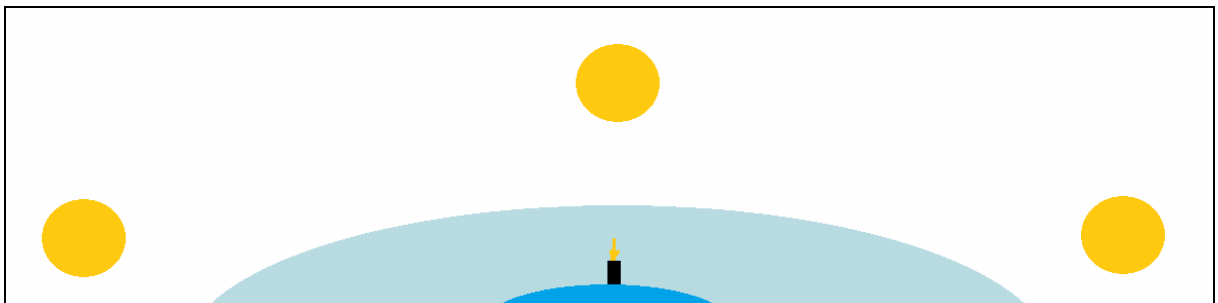


Abb. 2.8.: Sonnenstandsänderung im Verhältnis zur Teleskopposition. Das Empfangsteleskop (schwarz) steht vertikal.

Theoretisch nimmt der Polarisationsgrad mit der Höhe der Sonne ab. Steht bei Dämmerung die Sonne flach am Himmel, so ist der Winkel zwischen dem senkrecht stehenden Empfangsteleskop und der Einfallsebene der Sonne sehr groß. Das Licht trifft dann hauptsächlich indirekt durch Streuung auf das Empfangsteleskop und wurde fast um 90° zur Einfallsebene der Sonne gestreut. Je tiefer die Sonne steht, desto stärker wurde also das auf dem Teleskop ankommende Licht gestreut. Das zur Mittagszeit vom Teleskop empfangene Licht wurde am wenigsten gestreut und ist am geringsten polarisiert. Das kurz nach Sonnenauf- und vor Sonnenuntergang auf das Teleskop treffende Licht ist maximal polarisiert.

Die in der Atmosphäre vorhandenen Aerosolteilchen haben allerdings eine depolarisierende Wirkung auf das Himmelslicht. Je mehr Aerosolteilchen sich in der Atmosphäre befinden, desto stärker wird das Licht depolarisiert.

Auf Grund dieser Abhängigkeiten wird theoretisch angenommen, dass der Polarisationsgrad gegen Mittag abnimmt und eine Wetterabhängigkeit des Polarisationsgrades besteht.

3. Entwicklung und Aufbau des Polarisationsfilters im neuen Empfangszweig

In Abschnitt 2.5. wurde schon beschrieben, wie störend sich das Untergrundsignal auf die Temperaturmessung mit Lidars auswirkt. Außerdem wurden die am tageslichtfähigen RMR-Lidar des IAP angewandten Techniken zur Reduzierung des Untergrundes erläutert. Eine weitere Möglichkeit zur Unterdrückung der Sonnenstrahlung bietet der Einbau eines Polarisationsfilters in den Empfangszweig des RMR-Lidars. Dabei wird die lineare Polarisation des Lasers ausgenutzt. Der Polarisationsfilter kann so eingestellt werden, dass das Laserlicht transmittiert und ein Teil des Sonnenlichts herausgefiltert wird. Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Einbau eines solchen Polarisators geplant und umgesetzt. In den folgenden Abschnitten wird auf die Konzeption der einzelnen Komponenten (Abschn. 3.1. und 3.2.) eingegangen. Diese werden vorab erläutert und in Abbildung 3.1. dargestellt. Danach wird die praktische Umsetzung dieser Konzepte beschrieben (Abschn. 3.3.). Es wird gezeigt, wie die Komponenten justiert und untereinander sowie mit dem schon vorhandenen Aufbau lichtgeschützt und bestmöglich verbunden werden.

Der neue Empfangszweig des tageslichtfähigen RMR-Lidars ist wie in Abbildung 3.1. beschrieben aufgebaut. Das zurückgestreute Laserlicht, aber auch Sonnenlicht, treffen auf das Empfangsteleskop und werden fokussiert. Das Empfangsteleskop hat einen Durchmesser d_T von 800 mm und eine Brennweite f_T von 3200 mm. Der Fokus des Empfangsteleskops sitzt jeweils näherungsweise auf den Flächen des Strahlteilergehäuses. Danach durchläuft der reflektierte Strahlteil die erste Linse. Diese Linse parallelisiert den Strahl, dafür sitzt der objektseitige Fokus dieser Linse genau auf dem Teleskopfokus. Der parallele Strahlengang ist wichtig, da nur so der nachfolgende Polarisator korrekt arbeitet. Die zweite Linse fokussiert den Strahl in die 200 μm dünne Multimodefaser.

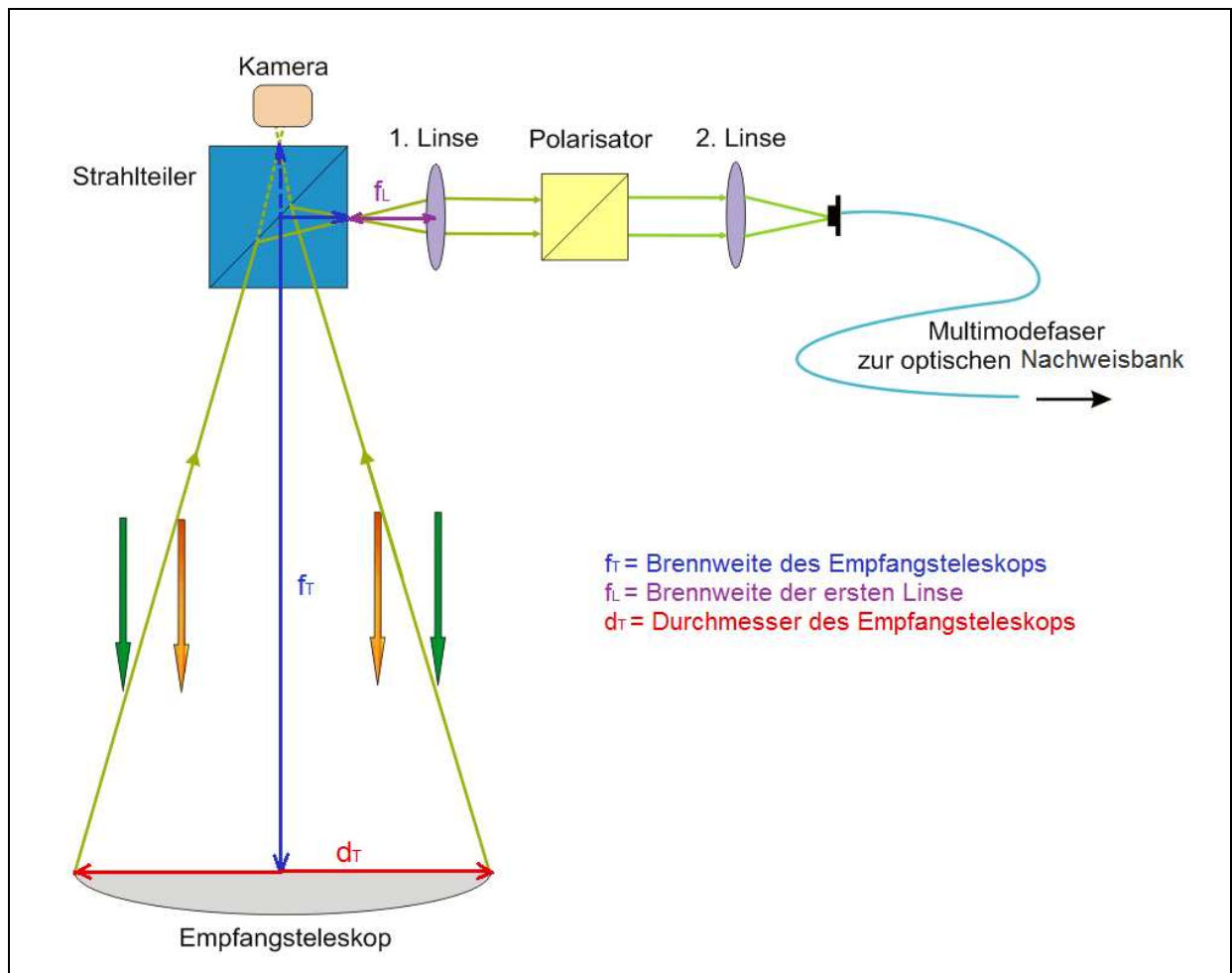


Abb. 3.1.: Schematischer Aufbau des neuen Empfangszweiges des tageslichtfähigen RMR-Lidars. Die Fokusslänge ist für die gedachte Verlängerung des Strahles hinter dem halbdurchlässigen Spiegel die gleiche, wie für den gebrochenen Strahl. Der Fokus sitzt auf dem Gehäuse des Würfels des halbdurchlässigen Spiegels.

3.1. Konzeption der Linse und Berechnung des Strahldurchmessers

Der gesamte Aufbau soll später zur Halterung und zur Reduzierung von einfallendem Streulicht in ein Tubussystem der Marke Thorlabs eingepasst werden. Dieses System ist zum Beispiel auf ½"-, auf 1"- oder auf 2"-Tuben ausgelegt (" = Zoll = 25,4 mm). Die Linsen sowie der Polarisator sind ebenfalls in verschiedenen Größen erhältlich. Der Polarisationszweig wird durch das zum Tubussystem gehörige Stangensystem am

Halterungswürfel des Strahlteilers befestigt. Dieser Aufbau wird durch ein dünneres Stangensystem über dem Empfangsteleskop gehalten. Um den ganzen Polarisationszweig nicht zu stark zu belasten und den Schwerpunkt möglichst nah am Teleskopmittelpunkt zu halten, sollten die nachfolgenden Teile so klein und kurz wie möglich konzipiert werden. Für die Konzeption des folgenden Polarisationsaufbaus ist demnach die Kenntnis des Strahldurchmessers im parallelen Strahlengang wichtig. Dieser ist von der Brennweite der ersten Linse abhängig.

Die Brennweite der ersten Linse sollte für einen kurzen Polarisationszweig so gering wie möglich gehalten werden. Doch kann sie nicht beliebig nah an den Fokus des Empfangsteleskops platziert werden. Wie in Abbildung 3.3. zu sehen ist, müssen noch zwei, im Aufbau schon vorhandene, Bauteile zwischen dem Strahlteilergehäuse und der ersten Linse berücksichtigt werden. Zum einen die 12 mm breite Blende, zur Reduzierung des Streulichts, die direkt am Würfel des Strahlteilers angebracht ist. Des Weiteren muss der ebenfalls schon im Aufbau vorhandene, 12,5 mm breite Adapter berücksichtigt werden. Dieser dient der Umstellung des Stangensystems. Der Abstand der Stangen muss für den späteren Schiebetisch CT1 (siehe Abschnitt 3.3.) von 60 mm auf 30 mm verringert werden.

Die Brennweite der Linse darf die Summe der Breiten dieser beiden Bauteile nicht unterschreiten und muss damit größer als 24,5 mm sein. Außerdem sollte zur Verringerung der Dispersion und der Abbildungsfehler eine achromatische Linse verwendet werden. Die Linse sollte so groß gewählt werden, dass sie in das 1"-Tubesystem eingepasst werden kann. So kann sie später leicht mit dem nachfolgenden Schiebetisch verschraubt werden. Da mit der zweiten Harmonischen des Nd:YAG-Lasers bei einer Wellenlänge von 532 nm gearbeitet wird, sollte die Linse für diesen Wellenlängenbereich eine Antireflexbeschichtung aufweisen. Es wäre außerdem von Vorteil, wenn die erste und die zweite Linse identisch wären. Da die 200 μm Multimodefaser und das Empfangsteleskop die gleiche numerische Apertur haben, kann so eine Eins-zu-Eins-Abbildung gewährleistet werden.

Entsprechend der gewünschten Eigenschaften der Linsen wurde die Linse AC254-030-A-ML der Marke Thorlabs als erste und zweite Linse im Aufbau ausgewählt. Dieser Achromat hat eine angegebene Brennweite von 30 mm und ist im Bereich von 400-700 nm antireflexbeschichtet. Die gewählte Linse hat demnach bei 532 nm einen geringen Reflexionskoeffizienten (ca. 1 % Gesamtverlust an beiden Linsenflächen, [vgl. Thorlabs]).

Um Abbildungsfehler zu mindern, darf die Linse keinesfalls voll ausgeleuchtet werden. Der Strahldurchmesser oder auch der Durchmesser der ausgeleuchteten Linsenfläche wird im Folgenden mit d_{Linse} bezeichnet. Unter Einbeziehung der Linsenbrennweite von 30 mm, der Teleskopbrennweite von 3200 mm und des Teleskopdurchmessers von 800 mm ergeben sich für den Strahldurchmesser folgende Berechnungen:

$$\frac{f_T}{d_T} = \frac{f_L}{d_{Linse}} \quad (3.1)$$

$$d_{Linse} = \frac{800mm \cdot 30mm}{3200mm} = \underline{\underline{7,5mm}}$$

Damit ist ein Linsendurchmesser von etwa 1" völlig ausreichend, um eine Ausleuchtung des Linsenrandes zu vermeiden. Die Linsen wurden schon mit einem passenden Tubus als Halterung bestellt. Jedoch wurde die erste Linse zur besseren Streulichtabdichtung in einem 1" langen (SM1L10) Tubus befestigt.

3.2. Konzeption des Polarisators

Um das schwache Signal aus der Mesosphäre nicht zu schwächen, muss der gewählte Polarisator einen großen Transmissionskoeffizienten haben. Polarisationsfilter, die das Licht mit Hilfe von Polarisationsfolien polarisieren, wirken über das gesamte Spektrum wie ein Graufilter. Sie transmittieren nur Licht einer Polarisationsrichtung und absorbieren das restliche Licht. Ein solcher Polarisationsfilter wäre leichter in den Empfangszweig zu integrieren gewesen, da bei diesen Filtern kein paralleler Strahlengang erforderlich ist. Allerdings haben diese Polarisatoren nur einen Transmissionskoeffizienten von 70 - 80 % und würden zu viele Photonen des schwachen Signals absorbieren. Polarisatoren, die auf dem Prinzip der Doppelbrechung basieren, haben mit über 90 % deutlich höhere Transmissionskoeffizienten [vgl. Thorlabs]. Die angebotenen Polarisatoren, wie Glan-Taylor-, Glan-Thompson- oder Wollastonpolarisatoren bestehen aus dem anisotropen Kristall Kalzit - auch Kalkspat genannt. Das Material Kalkspat ist allerdings nicht witterungsresistent und daher für die Anwendung im Empfangszweig des Lidars nicht geeignet.

Es wurde daher ein Polarisator verwendet, der auf dem Prinzip der Polarisation an dielektrischen Schichten basiert. Er besteht aus zwei zum Würfel zusammengesetzten Prismen. Auf der diagonalen Fläche zwischen diesen beiden Prismen befindet sich eine dielektrische Schicht.

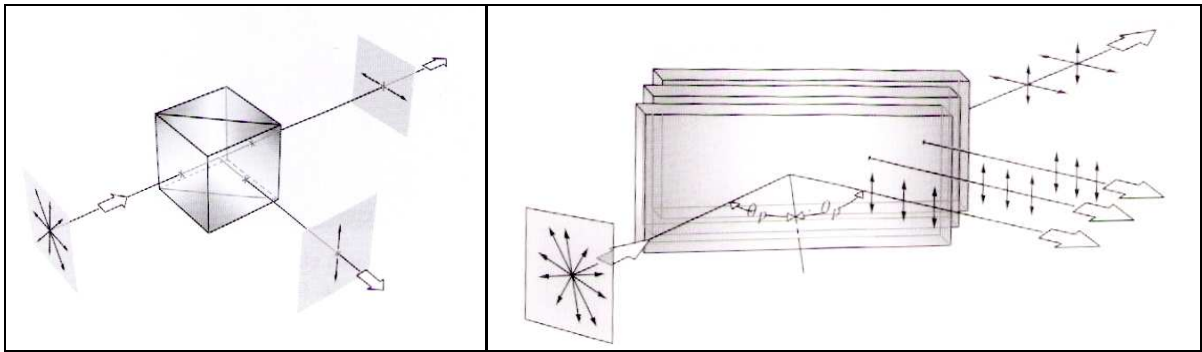


Abb. 3.2.: links: Polarisation an Polarisator mit dielektrischer Schicht als diagonale Fläche; rechts: Funktionsprinzip der dielektrischen Schicht anhand des Glasplattensatz-Polarisators [Hecht, S. 564]

Die Funktion dieser dielektrischen Schicht kann anhand des Glasplattensatz-Polarisators beschrieben werden (vgl. Abb. 3.2). Das Licht trifft im Brewsterwinkel auf die erste Glasplatte. In diesem Winkel ist das reflektierte Licht vollständig polarisiert. Der größte Teil des Lichts wird an der Glasplatte transmittiert und ist noch nahezu unpolarisiert. Dahinter trifft das Licht auf weitere Glasplatten, an denen der selbe Vorgang abläuft. Mit jeder Glasplatte wird mehr polarisiertes Licht reflektiert. Daher steigt auch mit jeder Glasplatte der Polarisationsgrad des transmittierten Lichts, bis auch der transmittierte Strahlteil polarisiert ist. Bei dem verwendeten Polarisator sind nun genauer genommen mehrere, sehr dünne dielektrische Schichten auf die gemeinsame Fläche der Prismen aufgedampft. Somit wird der Strahl in zwei orthogonal polarisierte Strahlteile getrennt und zum einen transmittiert und zum anderen im Winkel von 90° reflektiert. "Die Absorption [ist bei diesen Polarisatoren] gering oder null" [Hecht, 2002, S. 564].

Bei der Wahl der Kantenlänge des Polarisators muss der in Abschnitt 3.1. berechnete Strahldurchmesser im parallelen Strahlengang beachtet werden. Der Polarisator darf auch nicht voll ausgeleuchtet werden. Hersteller geben meist die Kantenlänge der Fläche an, bis zu der der Polarisator ordnungsgemäß funktioniert (clear aperture, dt. freie Apertur).

Auf Grund dieser Überlegungen wurde ein Polarisationsfilter von Melles Griot aus Bor-Kronglas BK7 verwendet (PBS-532-050). Der Würfel hat eine Kantenlänge von $\frac{1}{2}$ " und eine freie Apertur von mehr als 85 % der zentralen Eintrittsfläche. Das entspricht fast 10,8 mm. Damit ist die Größe des Polarisators bei einem Strahldurchmesser von 7,5 mm ausreichend. Der Polarisationsfilter ist für die Wellenlänge von 532 nm antireflexbeschichtet. Der Hersteller gibt für Polarisatoren dieser Art einen Transmissionskoeffizient von mindestens 95 % an, doch die vom Hersteller gemessene Transmission für den verwendeten Polarisator beträgt bei einer Wellenlänge von 532 nm sogar etwa 98 %. Die Eigenschaften des Polarisations-Strahlteilerwürfels sind in der Tabelle 3.1. zusammengefasst.

Antireflexbeschichtung	$R \leq 0,25 \text{ \% pro Oberfläche/Grenzfläche}$
Freie Apertur/Clear Aperture	$\geq 85 \text{ \% der zentralen Eintrittsfläche}$
Extinktion	$T_p/T_s > 1000:1$
Gesichtsfeld	$\pm 3^\circ$
Optisches Material	BK7
Reflexionskoeffizient	$R_s > 99,9 \text{ \%}$
Oberflächenqualität	20-10 scratch and dig
Transmission	$T_p > 95 \text{ \%}$

Tab. 3.1.: Herstellerangaben des verwendeten Polarisators von Melles Griot [Melles Griot]

Der Polarisator ist allerdings nicht in einer mit den anderen Komponenten der Marke Thorlabs kompatiblen Halterung verfügbar. Daher wurde eine Ummantelung eines Polarisators der Marke Thorlabs (Ummantelung des GT10-A) auf die Größe des Polarisators von Melles Griot angepasst. So konnte der Polarisator in diese Ummantelung eingeklebt und in der Halterung (Thorlabs, SM1PM10) fixiert werden. Diese ist später mit dem Rotationssystem drehbar.

3.3. Technische Umsetzung

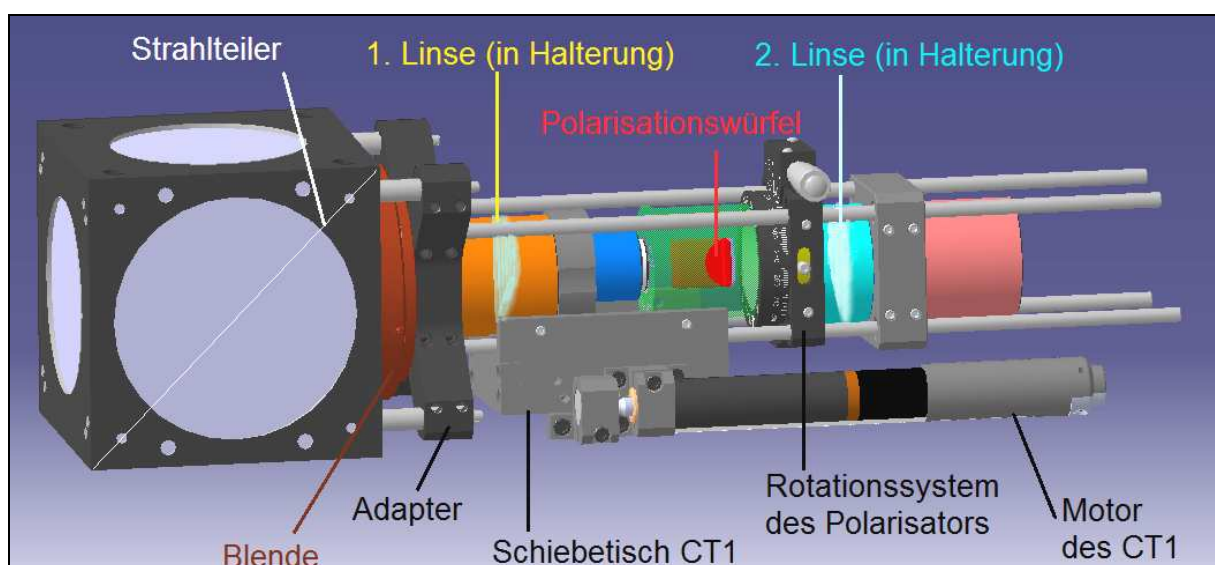


Abb. 3.3.: 3D-Abbildung des Polarisationszweiges vom Strahlteiler bis zur Glasfaser

In Abbildung 3.3. ist zur besseren Verdeutlichung der Positionen der einzelnen Bauteile der Aufbau des Polarisationszweiges dargestellt. Da alle Teile die gleiche schwarze Farbe haben, wurden zur besseren Erklärung die einzelnen Teile in einer 3D-Abbildung der technischen Zeichnung farbig gekennzeichnet.

Für einen parallelen Strahlengang muss der objektseitige Brennpunkt der ersten Linse genau auf dem Fokus des Empfangsteleskops sitzen. Der parallele Strahlengang ist zum einen notwendig, um eine optimale Arbeitsweise des Polarisators gewährleisten zu können. Die zweite Linse sorgt für eine bestmögliche Einkopplung in die Glasfaser. Dafür muss ihr bildseitiger Brennpunkt auf der Eintrittsfläche der 200 μm Multimodefaser sitzen.

Die beiden Linsen wurden zunächst im Labor vorjustiert. Dafür wurde das Laserlicht des Seedlasers über eine Siglemodefaser und eine Multimodefaser ins Labor geleitet. Die Multimodefaser wurde in einen Glasfaserhalter eingepasst. Damit konnte der Strahl innerhalb eines Stangensystems parallel zur Tischplatte und zentrisch zur zu justierenden Linse bewegt werden. Die Linse wurde so im Strahlengang positioniert, dass der Strahl zuerst auf die weniger gewölbte Linsenfläche trifft. Später wird im Empfangszweig jeweils die stärker gewölbte Linsenfläche dem parallelen Strahlengang zugewandt, um Linsenfehler zu mindern. Der Abstand zwischen Linse und Glasfaser wurde nun im Labor so eingestellt, dass der Strahl nach der Linse parallel verlief. So konnte der Brennpunkt der beiden Linsen bestimmt und die Linsen im Aufbau positioniert werden.

Doch unter Laborbedingungen kann nur eine erste Voreinstellung getroffen werden. Die optimale Position der ersten Linse erfordert eine erneute Justage im Empfangszweig. Mit Hilfe des Schiebetisches CT1 (von Thorlabs) kann diese genau positioniert werden. Darum ist die Halterung der ersten Linse über das Außengewinde mit dem Schiebetisch verschraubt. Der Schiebetisch hat einen Verfahrweg von 12 mm und ist mit einem Motor (Z812B von Thorlabs) PC-gesteuert einstellbar. Unter Beobachtung des zurückgestreuten Lasersignals kann die Linse nun an den Punkt des stärksten Atmosphärensignals gefahren werden.

Die Halterung des Polarisationswürfels ist mit dem Rotationssystem CRM1P/M von Thorlabs verschraubt. Damit kann der Polarisator später genau auf die Polarisationsrichtung des zurückgestreuten Laserlichts eingestellt werden. Dieses Rotationssystem ist aus Platz- und Gewichtsgründen nicht motorisiert.

Um einfallendes Streulicht zu vermeiden, wurden teilweise zusätzlich zum 1"-Tubussystem $\frac{1}{2}$ "-Tuben als Bindeglied eingesetzt. Das erste Bindeglied befindet sich zwischen der Halterung der ersten Linse und der Blende, da der Durchmesser der Blendenöffnung nur für $\frac{1}{2}$ "-Tuben ausgelegt ist. Das zweite Bindeglied wurde zwischen CT1 und Polarisationswürfel angebracht, wie in Abbildung 3.3. blau dargestellt ist.

4. Ergebnisse der Atmosphärenmessungen

Um den am Tag auf das Empfangsteleskop treffenden Untergrund genauer charakterisieren zu können, wurden zunächst Versuche und Messungen bezüglich des Sonnenlichtes durchgeführt. Um die Polarisatorstellung mit dem geringsten Signalverlust zu bestimmen, wurde die Polarisationsrichtung des zurückgestreuten Laserlichtes gemessen. Mit Hilfe dieser Messungen konnten Abschätzungen zur Wirksamkeit des Polarisators getroffen werden.

4.1. Messungen zur Polarisation des Untergrundes

Da das an Luftmolekülen gestreute Sonnenlicht teilweise polarisiert ist, ist auch das auf dem Empfangsteleskop auftreffende Sonnenlicht - der Signaluntergrund - teilweise polarisiert. Der Polarisationsgrad und die Polarisationsrichtung des Himmelslichts sind von verschiedenen Umwelteinflüssen abhängig. Sie bestimmen maßgeblich, wie viel Untergrundsignal vom Polarisationsfilter geblockt werden kann. Um also die Wirksamkeit des Polarisationswürfels abschätzen zu können, muss das genaue Verhalten des polarisierten Himmelslichts in Abhängigkeit dieser Parameter bekannt sein.

Daher wurden zunächst Messungen zur Charakterisierung des Untergrundsignals durchgeführt. Da nur das Untergrundsignal detektiert werden sollte, wurde ohne Sendeeinheit - ohne Lasersignal - gemessen. Für die Messreihe wurde der Polarisationswürfel in 10° -Abständen mit dem Rotationssystem gedreht und das von den Detektoren erhaltene Signal aufgenommen und über jeweils 1000 Messzyklen (ein Messzyklus würde der Dauer eines Laserpulses entsprechen) gemittelt. Entsprechend der Skala des Polarisators ist das Licht bei einer Polarisationsrichtung von 0° vertikal - senkrecht zum Boden - polarisiert. Vor und nach jeder Messreihe wurde der Untergrund ohne Polarisationsaufbau bestimmt. Damit kann eine Aussage über die Kontinuität des Untergrundsignals getroffen werden. Die entsprechenden Messwerte werden an eine Sinusschwingung angepasst. Bei starken Änderungen des Untergrundes muss dieser Sinusschwingung ein linearer Anteil beigelegt werden.

4.1.1. Die Polarisationsrichtung des Untergrundsignals

Wie schon im Abschnitt 2.5.2. beschrieben, ändert sich die Polarisationsrichtung des Himmelslichts um 15°/h. Somit ändert sich auch die Polarisationsrichtung des Untergrundsignals um 15°/h. Dies konnte durch die Untergrundmessungen bestätigt werden.

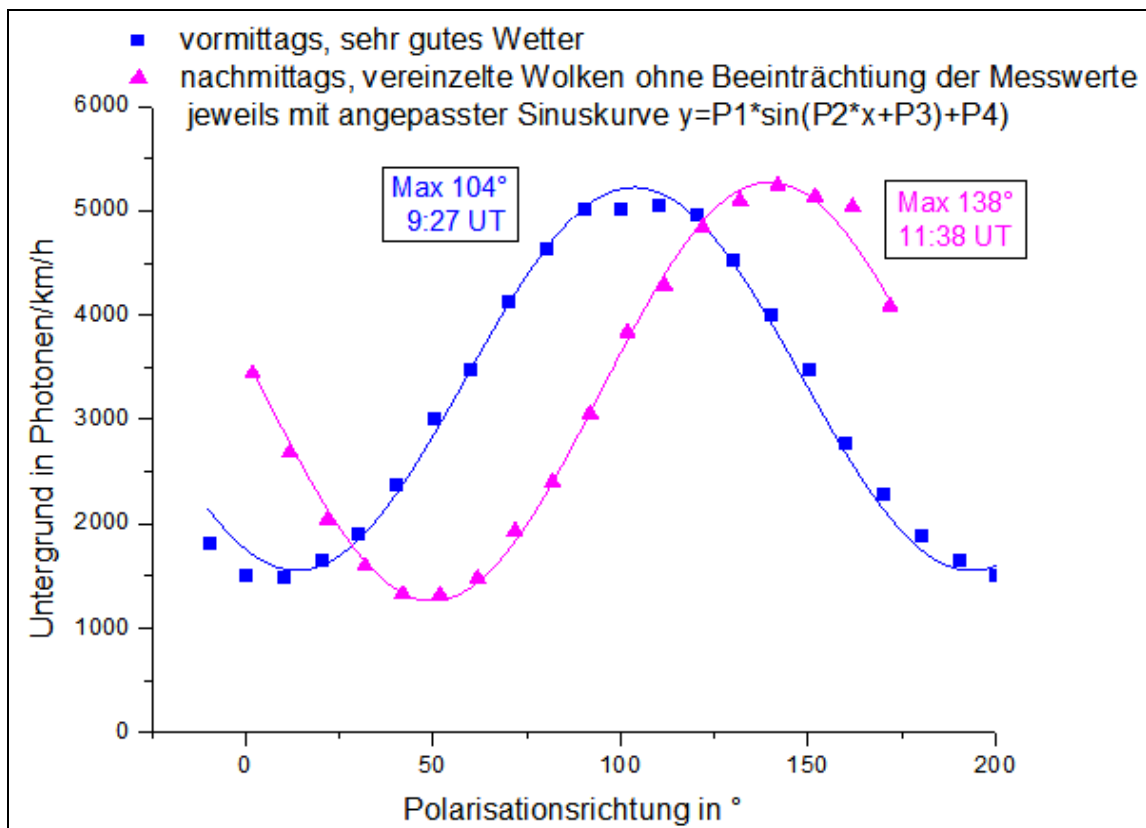


Abb. 4.1.: Zwei Messreihen zur Polarisation des Untergrundes vom 26.10.2010. Die blaue Messkurve zeigt die Messung von 9:11 UT bis 9:39 UT. Die rosafarbene Kurve stellt die Messung von 11:23 UT bis 11:43 UT dar. Beide Messreihen wurden durch Sinuskurven angepasst.

Die in Abbildung 4.1. dargestellten Messungen wurden am 26.10.2010 im Abstand von etwas mehr als zwei Stunden durchgeführt. In dieser Zeit verschob sich die Polarisationsrichtung des Untergrundes (vgl. Maximum der Sinusschwingung) um 34°.

Noch deutlicher wird die Verschiebung der Polarisationsrichtung, wenn man die Polarisationsmaxima aller Messreihen in Abhängigkeit von der jeweiligen Tageszeit aufträgt (Abb. 4.2.). Der Anstieg dieser angepassten Funktion müsste 15°/h betragen. Da aber der Untergrund wetterbedingt nicht konstant bleibt, sind auch die Messwerte starken Schwankungen unterlegen und fehlerbehaftet. Daher konnte mit den wenigen vorhandenen

Messreihen die Änderung von 15°h nur näherungsweise nachgewiesen werden (Anstieg = 14,4°h).

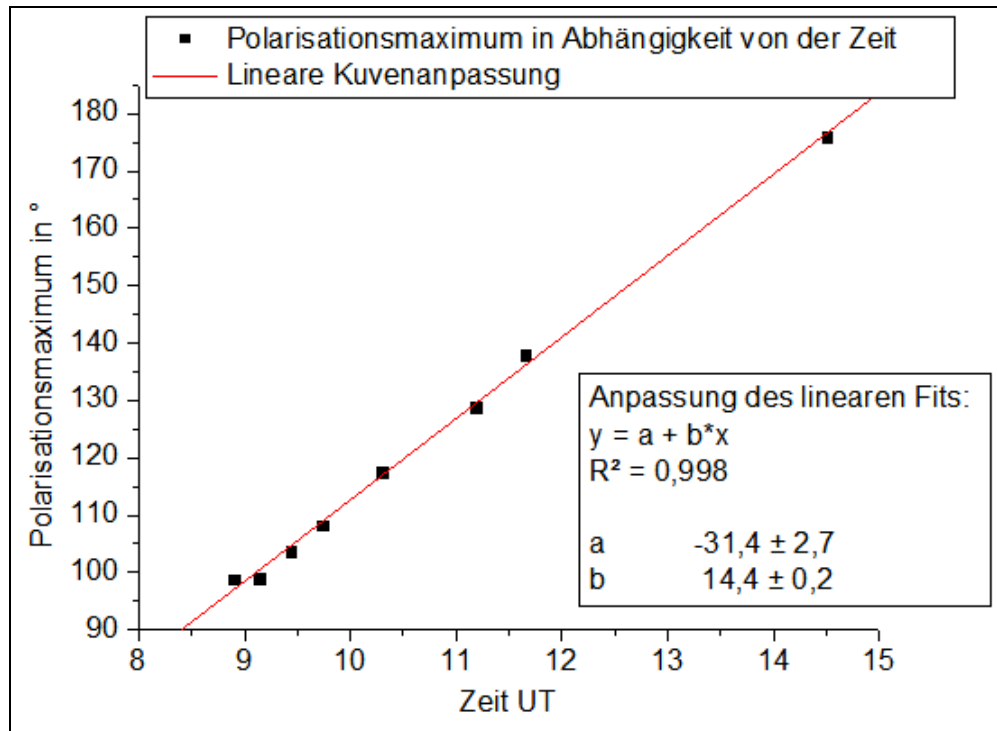


Abb. 4.2.: Darstellung der gemessenen Polarisationsmaxima in Abhängigkeit von der Zeit. An die Messwerte wurde eine lineare Funktion angepasst (rot). Der Kurvenanstieg von 14,4 ist natürlich bei wenigen Datenpunkten mit Messfehlern behaftet, zeigt aber näherungsweise die erwartete Änderung der Polarisationsrichtung um 15°h.

4.1.2. Der Polarisationsgrad des Untergrundsignals

Wie in Abschnitt 2.5.2. beschrieben, besteht eine Abhängigkeit des Polarisationsgrades von mehreren Parametern. Zum einen hängt der Polarisationsgrad vom Winkel zwischen der Einfallsebene der Sonne und dem Empfangsteleskop ab. Je größer der Winkel, desto stärker wurde das Licht gestreut. Zum anderen besteht eine Abhängigkeit vom Aerosolgehalt der Atmosphäre. Je mehr Aerosole sich in der Atmosphäre befinden, desto stärker wird das Himmelslicht depolarisiert. Die Polarisationsmessungen zu verschiedenen Tageszeiten sollen auch Aufschluss über die Abhängigkeit des Polarisationsgrades von der Tageszeit geben. Tabelle 4.1. zeigt Polarisationsgrad und -richtung der einzelnen Messungen. Außerdem wurden die Wetterbedingungen, die zur Zeit der Messungen vorherrschten, notiert. Bei sehr gutem Wetter war ein augenscheinlich blauer Himmel zu sehen. Die Bemerkung "gutes Wetter" deutet an, dass zeitweise kleine Zirrenwolken am Himmel entlang zogen.

Datum	mittlere Uhrzeit UT	Polarisationsgrad	Polarisationsrichtung	Wetter
18.10.2010	08:59	0,38	99°	gut
18.10.2010	09:46	0,39	108°	gut
25.10.2010	09:07	0,53	99°	sehr gut
26.10.2010	09:25	0,54	104°	sehr gut
26.10.2010	11:33	0,55	138°	gut
27.10.2010	07:50	0,055	80°	bedeckt
01.12.2010	10:15	0,58	129°	gut
01.12.2010	11:05	0,55	117°	gut
01.12.2010	15:21	0,65	176°	gut

Tab. 4.1.: Messbedingungen und Ergebnisse der einzelnen Messreihen

Leider war aus den einzelnen Messwerten keine tageszeitliche Abhängigkeit des Polarisationsgrades zu erkennen. Die Messungen wiesen von Tag zu Tag sehr große Unterschiede auf. Teilweise können diese Unterschiede nicht durch sichtbare Veränderungen der Wetterbedingungen erklärt werden. Aus der sichtbaren Betrachtung, ob zur Messzeit gutes oder sehr gutes Wetter vorherrschte, können keine Rückschlüsse auf den tageszeitabhängigen Polarisationsgrad getroffen werden. Der Polarisationsgrad reagiert offensichtlich sensibler auf Wetteränderungen, als mit dem menschlichen Auge zu sehen ist. Der Polarisationsgrad nahm bei gutem Wetter, bei dem auch Lidarmessungen durchgeführt werden könnten, Werte zwischen 0,38 und 0,65 an.

Bei bedecktem Himmel befinden sich besonders viele streuende Aerosolteilchen in der Luft. Die Messreihe am 27.10.2010 zeigt, dass bei bedecktem Himmel der Polarisationsgrad um etwa eine Größenordnung abnimmt. Die Zunahme der Depolarisation durch Aerosolstreuung hat demnach eine besonders starke Wetterabhängigkeit des Polarisationsgrades zur Folge. Dieser Messwert dient nur zur Verdeutlichung der starken Wetterabhängigkeit der Polarisation. Für die weiteren Betrachtungen hat dieser Wert keine Relevanz, da die hier diskutierten Lidarmessungen nur bei gutem und klarem Wetter durchgeführt werden.

Außerdem muss der Polarisationszweig bei Beobachtungen von leuchtenden Nachtwolken bedacht werden. Im Falle der Aerosolstreuung kommt es zu einer leichten Depolarisation, also zu einer leichten Verschiebung der Polarisationsrichtung. Daher wird das von der leuchtenden Nachtwolke detektierte Signal in Zukunft etwas geringer sein. Dafür können nun auch in Kühlungsborn leichter Polarisationsmessungen zur Untersuchung der Teilchengröße und Teilchenform durchgeführt werden.

4.2. Optimale Stellung des Polarisators

Da kein zurückgestreutes Laserlicht verloren gehen darf, ist für Lidarmessungen die Rotationsrichtung des Polarisationswürfels mit der Richtung des zurückgestreuten Laserlichts festgelegt.

Die Messungen zur Laserlichtpolarisation wurden am 01.12.2010 durchgeführt (Abb. 4.3.). Dabei wurde der Polarisationsfilter wieder in 10°-Abständen gedreht. Zusätzlich zum jeweiligen Signaluntergrund wurde diesmal auch jeweils das zuvor ausgesendete Laserlicht detektiert. Diese Messungen wurden aus technischen Gründen mit dem Laser des Nacht-RMR-Lidar durchgeführt. Daher konnten die Messungen nur im Bereich der Troposphäre durchgeführt werden. Die erhaltenen Laserzählraten sind nicht mit den Zählraten zu vergleichen, die mit dem neuen Laser detektiert werden (vgl. Abschn. 2.4.).

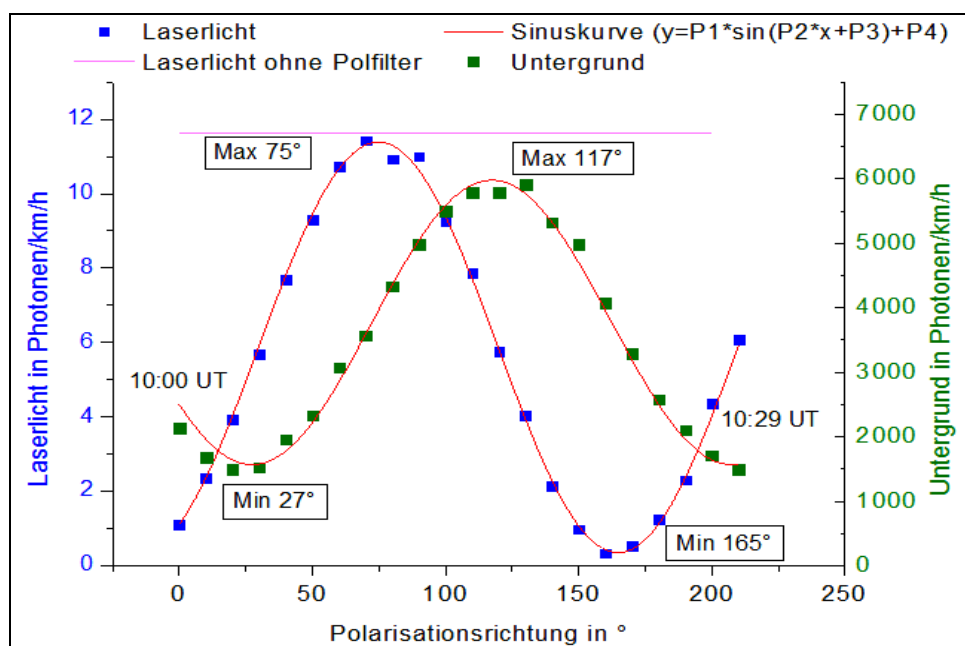


Abb. 4.3.: Gleichzeitige Polarisationsmessung von zurückgestreutem Laserlicht (blaue Messpunkte, blaue Skala) und Signaluntergrund (grüne Messpunkte, grüne Skala) am 01.12.2010. An beide Messkurven wurde eine Sinusfunktion angepasst (rot)

Die Messungen ergaben, dass sich die Polarisationsrichtung des Nacht-RMR-Lasers bei einer Polarisatorstellung von 75° befindet. Es ist bekannt, dass die Polarisationsrichtung des neuen Lasers um ca. 70° zur Polarisation des Nachtsystemlasers verdreht ist. Die Polarisationsrichtung des neuen Lasers liegt etwa senkrecht zur Bodenfläche. Für nähere

Betrachtungen und die Abschätzungen der Wirksamkeit des Polarisators im tageslichtfähigen RMR-Lidar wird daher die Polarisationsrichtung des neuen Lasers bei 5° angenommen.

4.3. Abschätzung der Wirksamkeit des Polarisationsfilters

Aus technischen Gründen war es nicht möglich die Wirkung des Polarisators durch Messungen zu überprüfen. Daher wurde die Wirksamkeit des Polarisationsaufbaus mit den aus den Atmosphärenmessungen gewonnenen Ergebnissen abgeschätzt.

Abbildung 2.6. zeigt, dass zur Mittagszeit (gegen 12:00 UT) der Signaluntergrund am stärksten ist. Es wäre daher sehr wünschenswert, wenn zu dieser Zeit viel Signaluntergrund herausgefiltert werden könnte.

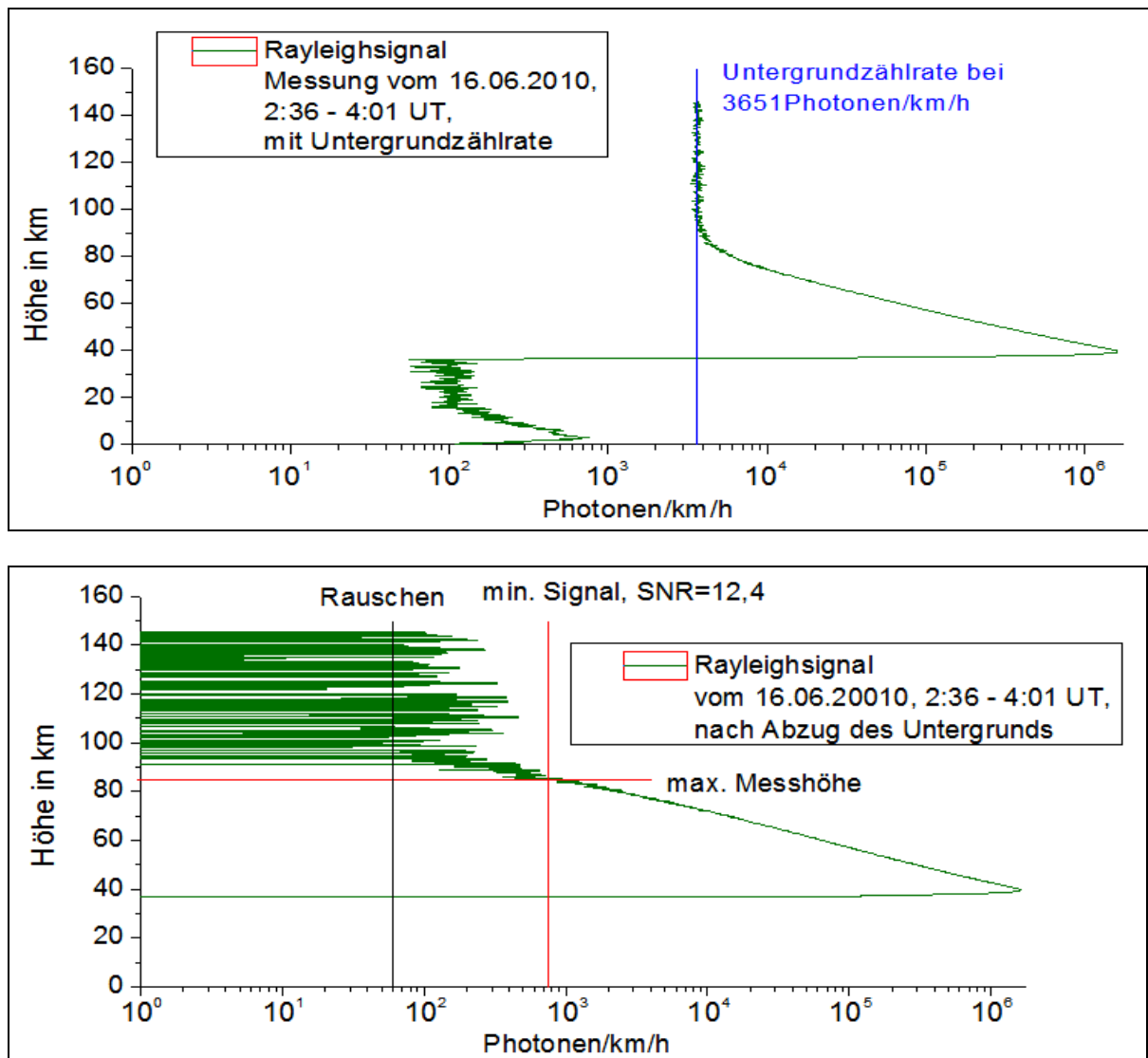


Abb. 4.4.: Messung des zurückgestreuten Rayleighsignals am 16.06.2010, 2:36 - 4:01 UT. oben: Signal mit der zusätzlichen Untergrundzählrate bei 3651 Photonen/km/h (blau); unten:

Signal ohne die zusätzliche Untergrundzählrate, ebenfalls eingezeichnet ist die maximale Messhöhe bei einem nötigen SNR von 12,4 (rot).

Die in Abbildung 4.4. dargestellte Messkurve zeigt beispielhaft eine Messung des zurückgestreuten Rayleighsignals mit dem tageslichtfähigen RMR-Lidar. Die Messung wurde am 16.06.2010, zwischen 2:36 und 4:01 UT noch ohne den neuen Polarisationszweig aufgenommen. Das gemittelte Untergrundsignal, das oberhalb von 120 km bestimmt wurde, lag bei 3651 Photonen/km/h. Es wurde über den gesamten Höhenbereich vom Messsignal abgezogen. Zurück blieb ein Rauschen von $\sqrt{3651 \text{ Photonen} / \text{km} / \text{h}} = 60 \text{ Photonen} / \text{km} / \text{h}$. Aus anderen Messungen ist bekannt, dass die nötige Signalqualität für die Temperaturberechnungen ab einem Signalrauschverhältnis 12,4 erreicht wird (vgl. Abschnitt 2.5.1). Aus diesen Werten kann nach Gleichung 2.6. das kleinste Signal errechnet werden, bei dem diese Strahlqualität noch gewährleistet werden kann.

$$Signal_{Min}(2:36 - 4:01 \text{ UT}) = 60 \text{ Photonen} / \text{km} / \text{h} \cdot 12,4 = 749 \text{ Photonen} / \text{km} / \text{h}$$

Die Höhe, bei der in der Messkurve dieses Signal detektiert wurde, ist die maximal mögliche Messhöhe für diese Messung. Für die Messung kurz nach Sonnenaufgang liegt die maximale Messhöhe bei ca. 85 km. Damit wird bei dieser Messung nur sehr knapp der Messbereich des Metallresonanzlidars erreicht.

Abbildung 4.5. zeigt eine weitere Messung, die am gleichen Tag um die Mittagszeit stattfand. Hier ist das Untergrundsignal auf 26467 Photonen/km/h gestiegen. Auch das Rauschen stieg damit auf 163 Photonen/km/h. Das für ein SNR von 12,4 berechnete Messsignal entspricht einer maximalen Messhöhe von nur noch 77 km. Bei dieser Höhe kann der Startwert der Temperaturberechnungen nicht der gleichzeitigen Messung des Metallresonanzlidars entnommen werden. Es kann kein durchgängiges Temperaturprofil erstellt werden.

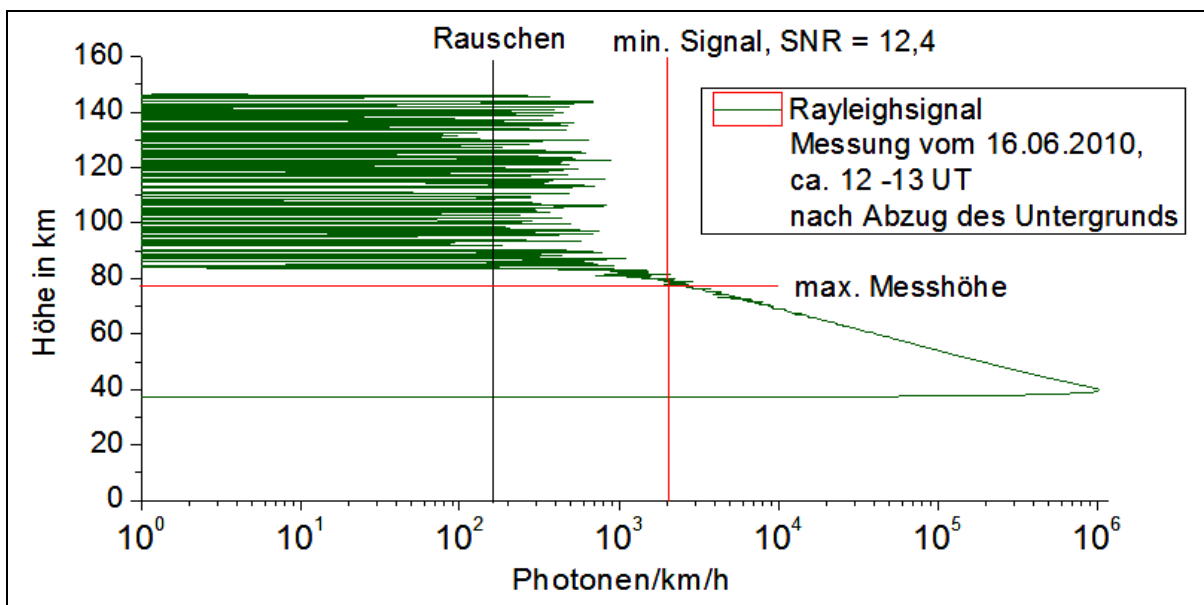
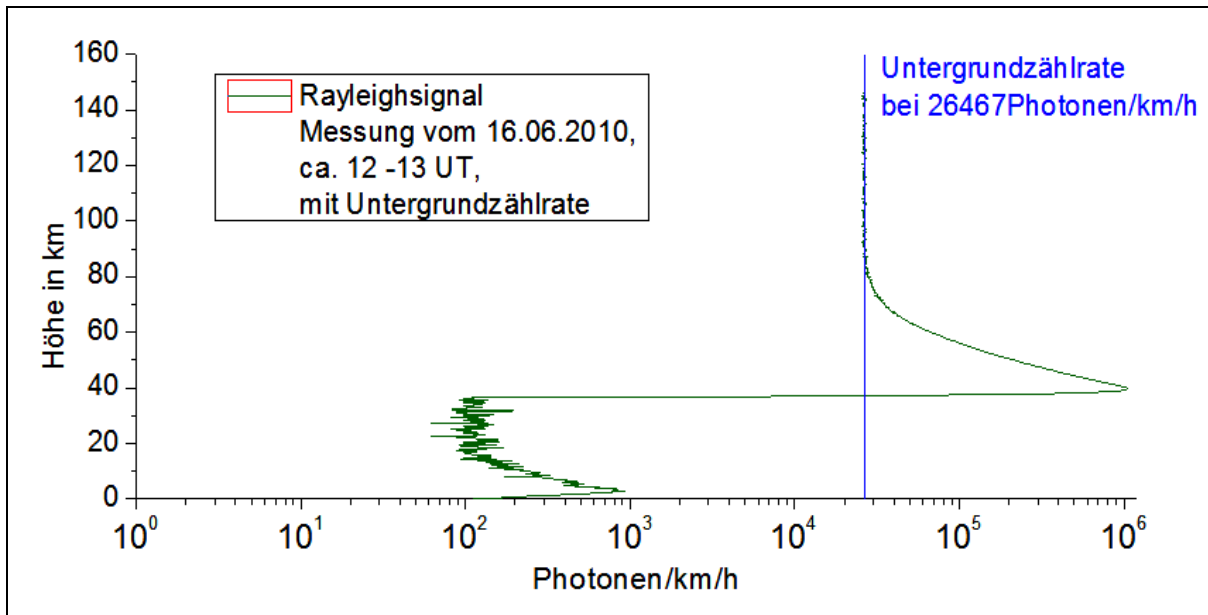


Abb. 4.5.: Messung des zurückgestreuten Rayleighsignals am 16.06.2010, ca. 12 - 13 UT. oben: Signal mit der zusätzlichen Untergrundzählrate bei 26467 Photonen/km/h (blau); unten: Signal ohne die zusätzliche Untergrundzählrate, rot eingezeichnet ist die maximale Messhöhe bei einem nötigen SNR von 12,4.

Um auch am Tag mit dem RMR-Lidar den Messbereich des Metallresonanzlidars zu erreichen, muss der Messbereich des RMR-Lidars noch um wenige entscheidende Kilometer ausgeweitet werden. Gegen Mittag wird die Messhöhe durch den hohen Untergrund am stärksten begrenzt (vgl. Abb. 2.6.). Daher sollte besonders zur Mittagszeit sollte viel des polarisierten Untergrundsignals herausgefiltert werden, um den Messbereich zu erhöhen. Der Wirkungsgrad des Polarisationsfilters zur Mittagszeit ist ausschlaggebend für Aussagen über den Nutzen des Polarisators.

Bei einer festgelegten Richtung des Polarisators von 5° wird über den Tag unterschiedlich viel des teilweise polarisierten Signaluntergrundes herausgefiltert. Dieses auf die Detektoren treffende Untergrundsignal ändert sich in Abhängigkeit von der Tageszeit wieder sinusförmig. Zweimal täglich, wenn die Polarisation des Himmelslichtes mit der Laserlichtpolarisation übereinstimmt, wird das detektierte Untergrundsignal maximal.

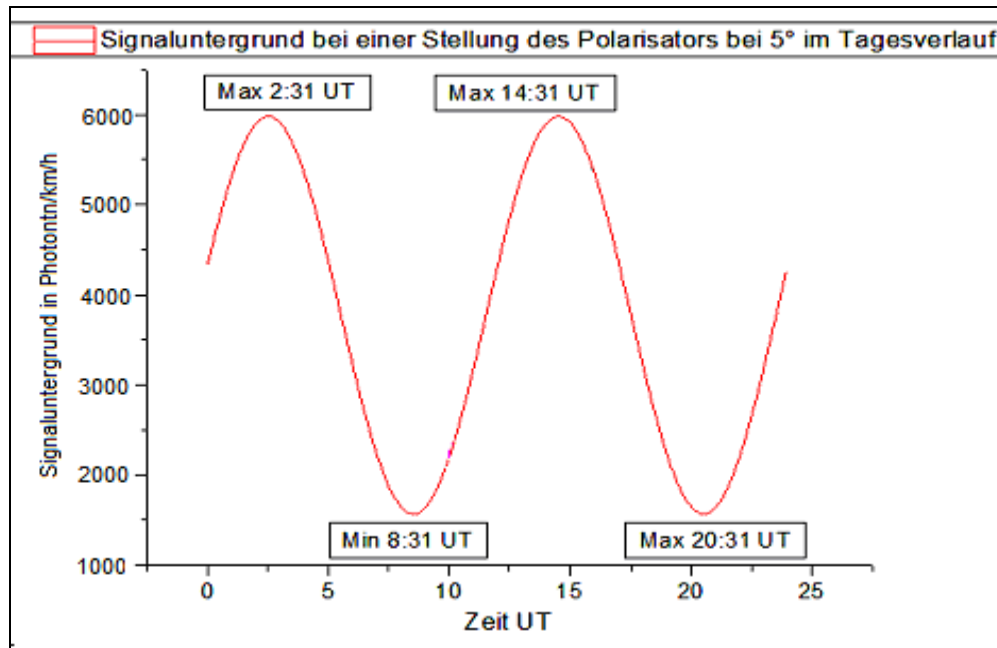


Abb. 4.6.: Auf die Detektoren treffender Signaluntergrund bei einer Stellung des Polarisators bei 5° in Abhängigkeit von der Tageszeit. Beispielhaft basierend auf den Daten der ersten Untergrundmessung vom 01.12.2010, 10:15 UT.

Der Verlauf des Untergrundes in Abhängigkeit von der Tageszeit wurde beispielhaft für die erste Messreihe am 01.12.2010 rechnerisch ermittelt. Die sich aus der ersten Messung zur Untergrundpolarisation ergebenden Daten entsprechen in etwa dem Mittelwert der anderen Messungen. Für eine Stellung des Polarisators bei 5° wurde am 01.12.2010 um 10:01 UT ein Untergrundsignal von 2238 Photonen/km/h detektiert. Unter Einbeziehung der Änderung der Polarisationsrichtung des Untergrundsignals um 15° h ($1^\circ = -4$ min), wurde nun die in Abb. 4.6. dargestellte Kurve errechnet.

Um 12:00 UT würde das detektierte Untergrundsignal 4342 Photonen/km/h betragen. Damit würden unter diesen Bedingungen zur Mittagszeit etwa 43 % des Untergrundsignals herausgefiltert.

Unter der Einbeziehung aller Messungen zur Untergrundpolarisation (außer 27.10.2010, bei bedecktem Himmel) liegt der Mittelwert des um 12:00 UT herausgefilterten Untergrundsignals bei ca. 45,2 % (Tab. 4.2.). Das zur Mittagszeit verbleibende Untergrundsignal ist demnach nur noch 0,548 Mal so hoch.

Datum	mittlere Uhrzeit UT	U _{Min}	U _{Max}	U _{12:00 UT}	η _{Ges} in %	η um 12:00 UT in %
		in Potonen/km/h				
18.10.2010	08:59	2623	5780	4578	31,2 - 68,8	45,5
18.10.2010	09:46	2974	6800	5209	30,4 - 69,6	46,8
25.10.2010	09:07	1600	5200	3758	23,5 - 76,5	44,7
26.10.2010	09:25	1600	5200	3705	23,5 - 76,5	45,5
26.10.2010	11:33	1700	5700	4181	23,0 - 77,0	43,5
01.12.2010	10:15	1600	5700	4342	21,9 - 78,1	42,9
01.12.2010	11:05	1500	5500	3854	21,4 - 78,6	44,9
01.12.2010	15:21	365	1775	1113	17,1 - 82,9	47,5
Mittelwerte:					24,0 - 76,0 %	45,2

Tab.4.2.: Polarisationsmessungen - Wirkungsgrad des Polarisators

Damit ergibt sich für das SNR um 12:00 UT folgende Berechnung:

$$SNR(12:00UT, \text{ mit Polarisator}) = \frac{Signal_{\min}}{\sqrt{Untergrund \cdot 0,548}}$$

Das SNR kann daher mit dem Polarisationsaufbau für 12:00 UT um den Faktor $\frac{1}{\sqrt{0,548}} = 1,35$ verbessert werden.

Damit kann für die Beispielmessung bei einem Untergrund von etwa 26467 ein Rayleighsignal von mindestens 1493 Photonen/km/h detektiert werden:

$$Signal_{\min} = 12,4 \cdot \sqrt{26467 \text{ Photonen / km / h} \cdot 0,548} = 1493 \text{ Photonen / km / h}$$

Die maximale Messhöhe der Messung des Rayleighsignals vom 16.06.2010 um ca. 12-13 UT erhöht sich so auf etwa 81 km.

Über den gesamten Tag wird in Abhängigkeit von der Tageszeit ein mittleres Untergrundsignal zwischen 24 % und 76 % herausgefiltert (Tab. 4.2.). Damit erhöht sich das

Signalrauschverhältnis je nach Tageszeit mindestens um den Faktor $\frac{1}{\sqrt{0,76}} = 1,15$ und

maximal um den Faktor $\frac{1}{\sqrt{0,24}} = 2,04$.

Um zur Mittagszeit jeweils den höchsten Anteil des polarisierten Himmelslichtes herauszufiltern, müsste die in Abb. 4.6. dargestellte Kurve des Signaluntergrundes um 3:29 h verschoben sein. Somit würde das Minimum, das sich bei einer Zeit von 8:31 UT befindet, bei 12:00 UT liegen. Für eine solche Verschiebung müsste man allerdings die feste Stellung des Polarisators und, um kein Rückstreusignal zu verlieren, auch die Laserlichtpolarisation um -52,3° ändern.

Signalverluste durch den Polarisator

Der zusätzliche Signalverlust durch den neuen Polarisationsaufbau im Empfangszweig wird auf maximal 4 % (jeweils 1 % Verlust durch die beiden Linsen und 2 % am Polarisator) geschätzt. Diese Herstellerangaben wurden unter Laborbedingungen getestet. Die Messergebnisse bestätigten näherungsweise die Richtigkeit der Verlustangaben.

Um den Signalverlust am Polarisationsfilter zu überprüfen wurden, am 01.12.2010 zwei Messungen durchgeführt. Das detektierte Lasersignal wurde dafür jeweils mit und ohne eingebauten Polarisationsfilter aufgenommen. Bei der Beispielmessung (01.12.2010, 10:15 UT) kam es zu einem Verlust des zurückgestreuten Lasersignals von 2,2 %. Das belegt näherungsweise den vom Hersteller angegebenen Signalverlust von ca. 2 % für den Polarisator. Die zweite Messung des 01.12.2010 hatte einen Verlust des Laserlichtes um 11,0 % zur Folge. Dieser unerwartet hohe Wert ist auf direkt neben dem Laserstrahl durchziehende Wolken zurückzuführen, die das Laserlicht möglicherweise depolarisiert haben. Wie alle Messwerte der Atmosphärenmessungen sind auch diese sehr stark wetterabhängig und fehlerbehaftet. Doch der Signalverlust der ersten Messung vom 01.12.2010 bestätigt in etwa die Richtigkeit der Abschätzungen und der Herstellerangaben. Die Verluste, die durch den Polarisationsaufbau entstehen, sind in Hinblick auf den Nutzen des Polarisators vertretbar.

5. Ausblick und Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Einbau eines Polarisationsfilters in den Empfangszweig des tageslichtfähigen RMR-Lidars am IAP geplant, umgesetzt und dessen Wirksamkeit abgeschätzt. Schätzungen zufolge kann durch den neuen Polarisationsaufbau im Empfangszweig die Untergrundzählrate tageszeitabhängig um etwa 24 - 76 % gesenkt werden. Die Messhöhe des tageslichtfähigen RMR-Lidars des IAP ist durch den starken Signaluntergrund gegen 12:00 UT am stärksten begrenzt. Durch den Einbau des neuen Polarisationszweiges können zur Mittagszeit schätzungsweise ca. 45 % des störenden Untergrundes herausgefiltert werden. Für die beispielhafte Messung am 16.06.2010 zwischen ca. 12:00 und 13:00 UT hätte so die Messhöhe um ca. 5 % von 77 km auf etwa 81 km gesteigert werden können. Im Winter würde diese Messhöhe auf Grund der geringeren Höhe der Metallschicht ausreichen, um den Messbereich des Metallresonanzlidars zu erreichen. Um auch im Sommer zur Mittagszeit den Messbereich des Metallresonanzlidars zu erreichen, müsste der Messbereich zusätzlich noch um mindestens 4 km erhöht werden.

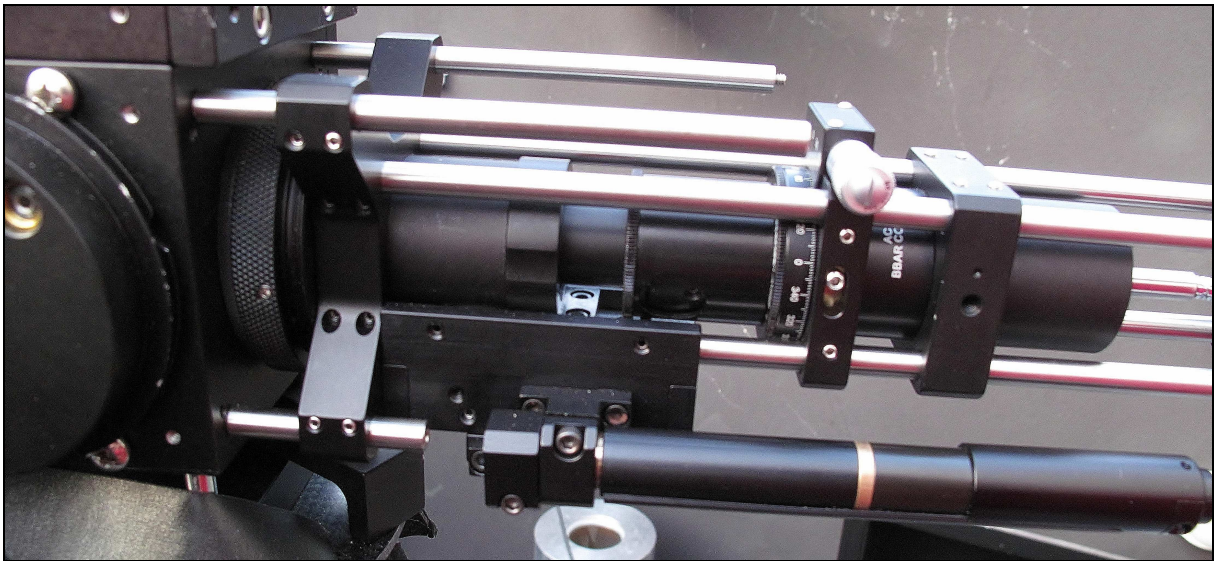


Abb. 5.1.: Fotografie des Polarisationszweiges vom Strahlteiler bis zur Glasfaser (Strahlteiler nur angeschnitten)

Durch eine Änderung der Position des Frequenzverdopplungskristalls ist es möglich, die Polarisationsrichtung des Lasers zu drehen. Dabei muss allerdings beachtet und getestet werden, ob die Umlenkspiegel für alle Polarisationsrichtungen den gleichen Reflexionskoeffizienten besitzen. Ist dies der Fall, könnte durch eine Änderung der Laserpolarisation der derzeitige Polarisationsaufbau besser genutzt werden. Für eine optimale Nutzung müsste die Polarisationsrichtung des Laserlichts um ca. -52° (gegen den

Uhrzeigersinn) gedreht werden, um zur Mittagszeit senkrecht zur Himmelslichtpolarisation zu schwingen. Das Laserlicht hätte dann eine Polarisationsrichtung von 133°. So könnte der Untergrund zur Mittagszeit um 76 % reduziert werden. Dadurch wäre ein Signal ab 998 Photonen/km/h messbar:

$$Signal_{\min} = 12,4 \cdot \sqrt{26467 \text{ Photonen / km / h} \cdot 0,24} = 988 \text{ Photonen / km / h}$$

Bei einer optimalen Stellung des Polarisators (= Laserlichtpolarisation) von 133° könnte die Messhöhe auf etwa 85 km erhöht werden. Dieser Wert wurde, zur besseren Ablesegenauigkeit, der Abbildung des Rayleighsignals am 16.10.2010 zwischen 2:36 und 4:01 UT (Abb. 4.4.) entnommen.

Um das Himmelslicht zu jeder Tageszeit optimal herausfiltern zu können, müsste der Polarisationsfilter während der Messung kontinuierlich gedreht werden. Für eine solche Drehvorrichtung müsste das Rotationssystem allerdings motorisiert werden. So kann eine PC-gesteuerte Regelung der Polarisatorrotation eingerichtet werden. Um hierbei nicht zeitweise auch das zurückgestreute Laserlicht herauszufiltern, müsste die Polarisationsrichtung des Lasers ebenfalls kontinuierlich während der Messung angepasst werden. Die Laserpolarisationsrichtung muss immer mit der Durchlassrichtung des Polarisationsfilters übereinstimmen. Dies könnte durch den Einbau eines ebenfalls motorisiert drehbaren $\lambda/2$ -Plättchen direkt hinter dem Laser realisiert werden. Das $\lambda/2$ -Plättchen müsste den hohen Energien des Lasers standhalten können. Eine solche Vorrichtung stellt sehr hohe technische Anforderungen. Außerdem sollte das derzeitige Stangensystem über dem Empfangsteleskop, welches den Strahlteiler, die CCD-Kamera und den Polarisationszweig trägt, nicht noch mehr belastet werden. Für ein solches Vorhaben müsste dieses Stangensystem erneuert und stabiler konzipiert werden.

Die Polarisationsrichtung des zum tageslichtfähigen RMR-Lidar zugehörigen Lasers - dem "neuen" Laser - bei 5° sollte eventuell noch einmal überprüft werden. Der derzeitige Polarisationsaufbau stellt eine effektive und sinnvolle Möglichkeit zur zusätzlichen Untergrundunterdrückung dar. Schätzungen zu Folge könnte durch die relativ leicht realisierbare Drehung der Laserlichtpolarisation auf 131° die maximale Messhöhe des RMR-Lidars auch im Sommer knapp den Messbereich des Metallresonanzlidars erreichen.

Literaturverzeichnis

Poster Optik 01, Einführung in die Forschungsgebiete der Abteilung "Optische Sondierung und Höhenforschungsraketen", am *Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik, zur Evaluierung 2008*.

Astronomie: www.astronomie.de/sonnensystem/erde/atme.htm, 02.11.2010, 12:10 Uhr

Roedel, W., Physik unserer Umwelt: die Atmosphäre, Berlin, Heidelberg, 1992, Seiten 14, 22 ff.

Hübner, F., Temperaturen der mittleren polaren Atmosphäre (15-80 km): Beobachtungen mit dem ALOMAR Rayleigh/Mie/Raman-Lidar 1995 und 1996 und Vergleiche, *Universität Rostock, Doktorarbeit*, 1998.

Alpers, M., Eixmann, R., Fricke-Begemann, C., Gerding, M., und Höffner, J., Temperature lidar measurements from 1 to 105 km altitude using resonance, Rayleigh, and rotational Raman scattering, *Atmos. Chem. Phys.*, 4 (3), 793–800, 2004.

Institutsbericht: Lübken, F.-J., Becker, E, Rapp, M, Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik an der Universität Rostock Institutsbericht 2008/2009, 2010, Seiten 37 ff.

Holste, H., Aufbau einer tageslichtfähigen Nachweisbank für ein Rayleigh-Lidar, *Universität Rostock, Diplomarbeit*, 2007

von Zahn, U., Höffner, J., Mesopause temperature profiling by potassium lidar, *Geophysical research letters*, Vol. 23, No. 2, 141-144, 1996

Eska, V., Höffner, J., von Zahn, U., Upper atmosphere potassium layer and its seasonal variations at 54°N, *Journal of geophysical research*, Vol. 103, No. A12, 29.207-29.214, 1998

Gerding, M., Höffner, J., Rauthe, M., Simultaneous observations of temperatures and ice-particles in the mid-latitude mesopause region, *Advances in Space Research* 40 (2007) 785–793, 2007.

Mie, G., Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidialer Metallösungen, *Annalen der Physik* 4. Folge, Band 25. 1908.

Gerding, M., Höffner, J., Lautenbach, J., Rauthe, M., Lübken, F.-J., Seasonal variation of nocturnal temperatures between 1 and 105 km altitude at 54 N observed by lidar, *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 7465–7482, 2008.

Poster Optik 09, Höffner, J, Baumgarten, G, Gerding, M, Fiedler, J, Lautenbach, J, Lübken F.-J., Schöch, A. , She, C.-Y., Neue technologische Entwicklungen bei Lidars, *am Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik, zur Evaluierung* 2008.

Gerding, M., Höffner, J., Kopp, M., Eixmann, R., Lübken, F.-J., Mesospheric temperature and aerosol soundings during day and night: Spectral and spatial filtering techniques, *Reviewed and revised papers at the 25th International Laser Radar Conference, St. Petersburg, Russia*, 67-70, 2010

Hecht, E., Optik, 4. Auflage, Addison-Wesley, Bonn, 2002, Seiten 109 ff., 526 ff., 546.

Thorlabs: www.thorlabs.com/navigation.cfm?Guide_ID=24, 27.02.2011, 20:00 Uhr

Melles Griot: www.cvimellesgriot.com/products/Laser-Line-PolarizingCube-Beamsplitters.aspx, 20.02.2011, 12:00

Leuchtende Nachtwolken, www.leuchtende-nachtwolken.de, 26.02.2011, 22:10

Anlagenverzeichnis

Anlage 1: Die Funktionsweise des Metallresonanzlidars.....	Blatt 1
Anlage 2: Leuchtende Nachtwolken.....	Blatt 2

Anlage 1: Die Funktionsweise des Metallresonanzlidars

Das Metallresonanzlidar basiert auf der Resonanzstreuung. Der Laser des Metallresonanzlidars regt Metallatome bei ihrer Resonanzfrequenz an, somit senden diese ihrerseits ebenfalls eine Welle der gleichen Wellenlänge aus. Die Metallatome existieren aber nur in einer Höhe zwischen 80 und 105 km, da hier die meisten Meteore verglühen und Metallspuren hinterlassen. Damit ist der Messbereich des Metallresonanzlidars auf den Bereich der Metallspuren begrenzt. Die Metallatome bewegen sich auf Grund der Brownschen Molekularbewegung. Diese hat eine temperaturabhängige Bewegung der Metallatome zur Folge. Diese Bewegung sorgt für eine Dopplerverbreiterung bei der Resonanzstreuung, die bei der Temperaturmessung mit dem Lidar bestimmt wird. Je höher die Temperatur, desto stärker bewegen sich die Metallatome und desto größer ist die Dopplerverbreiterung. Das Metallresonanzlidar des IAP detektiert Kaliumatome [z. B. von Zahn und Höffner, 1996].

Die Breite der Metallschicht und damit die Höhe des Messbereichs des Kaliumlidars variieren im Laufe des Jahres. Im Winter kann mit dem Kaliumlidar zwischen 80 und 105 km gemessen werden [von Zahn und Höffner, 1996]. Da aber im Sommer die Metallschicht etwa 5 -10 km schmaler ist, verringert sich damit der Messbereich des Metallresonanzlidars [Eska et al., 1998]. Im Sommer kann daher erst ab einer Messhöhe von etwa 85 km gemessen werden.

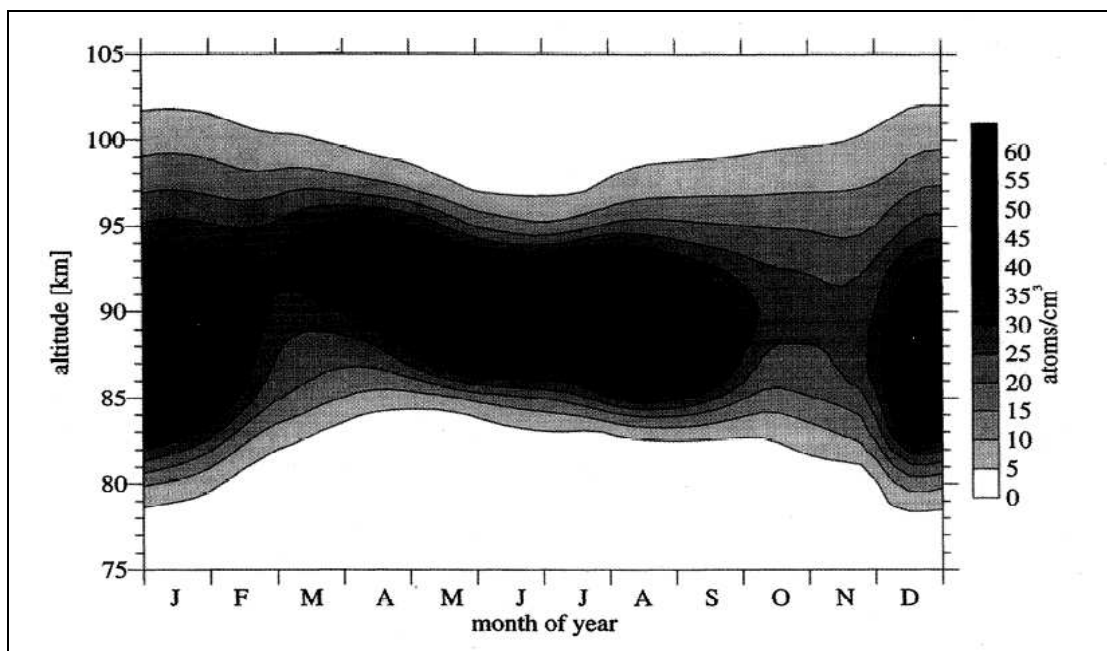


Abb. A1.: Änderung des Kaliumgehalts in Abhängigkeit von der Höhe und der Jahreszeit. Es ist zu erkennen, dass die Metallschicht im Sommer schmaler ist als im Winter. [Abb.: Eska et al., 1998]

Anlage 2: Leuchtende Nachtwolken



Abb. A2.: Foto einer leuchtende Nachtwolke [Foto: Leuchtende Nachtwolken]

Wenn die Temperaturen in der Mesosphäre in einer Höhe von ca. 87 km unter dem Gefrierpunkt liegen (in dieser Höhe ca. 145 K), bilden sich an Kondensationskeimen Eiskristalle. Die Eiskristalle wachsen immer mehr an, werden schwerer und sinken nach unten. Durch die nach unten ansteigenden Temperaturen verdampfen die Eiskristalle wieder. Die Eiswolken werden auch nach dem Sonnenuntergang noch eine Zeit lang von der Sonne angeleuchtet. Bei ca. 83 km sind die leuchtenden Nachtwolken am hellsten und können am besten beobachtet werden.

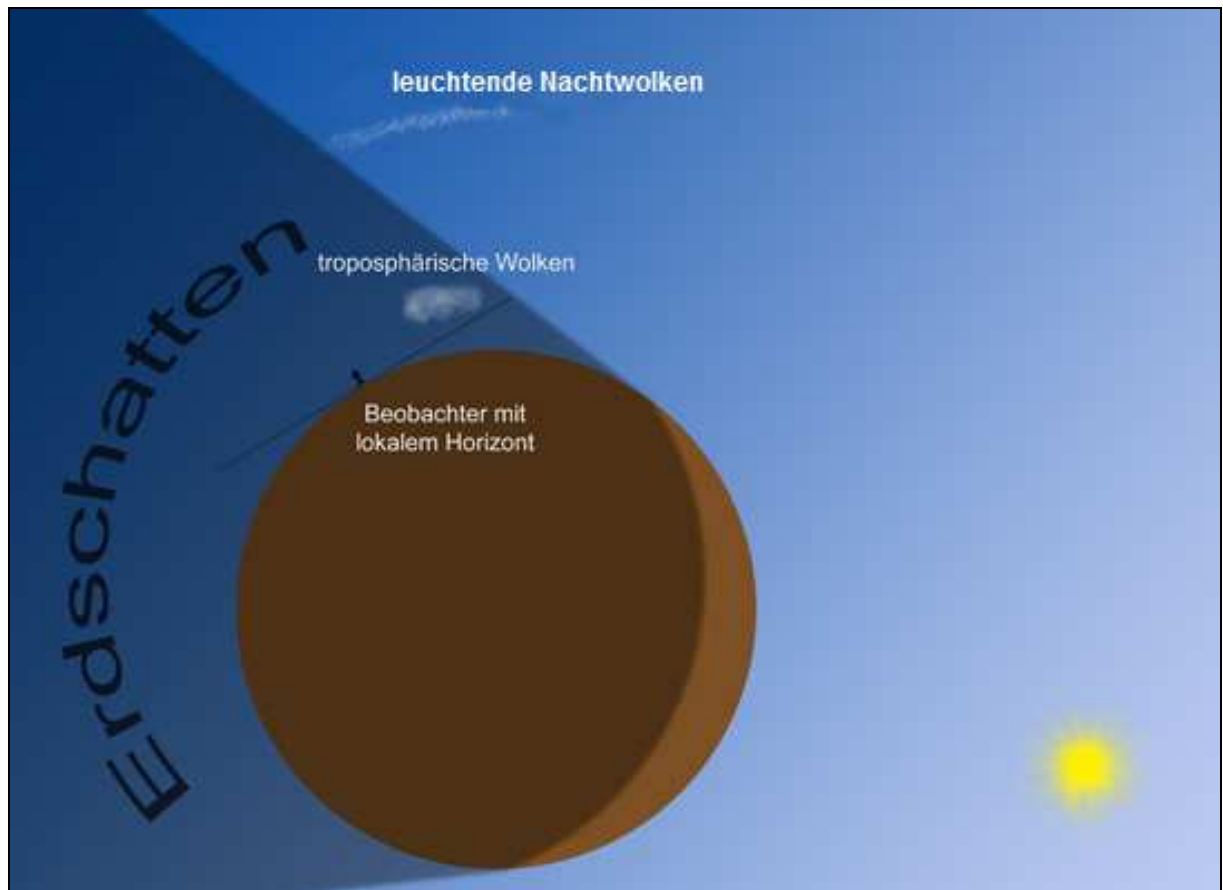


Abb. A3.: Entstehung leuchtender Nachtwolken. Ein im Erdschatten stehender Beobachter sieht die in 83 km Höhe von der Sonne angestrahlten Eisteilchen als "leuchtende" Wolken [Abb.: Leuchtende Nachtwolken]

Das Sonnenlicht wird an den Eisteilchen gestreut. Ein Beobachter sieht so im nachtschwarzen Himmel eine bunt schillernde Wolke (z.B. Abb. A.1.). Da sie nur entstehen, wenn in der Mesopausenregion der Gefrierpunkt unterschritten wird, gelten sie als Indikatoren für Klimaveränderungen. Bei Erwärmung der Mesosphäre würden die leuchtenden Nachtwolken immer seltener zu beobachten sein und bei einer Abkühlung häufiger. Daher wird dieses Phänomen am IAP mit besonderem Interesse untersucht.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1.: Temperaturprofil der Atmosphäre für Sommer und Winter	1
Abb. 1.2.: Temperaturmessungen über mehrere Tage (RMR-Lidar und K-Lidar)	3
Abb. 2.1.: Zusammengesetztes Temperaturprofil bei verschiedenen Starttemperaturen...	4
Abb. 2.2.: Schematischer Aufbau des tageslichtfähigen RMR-Lidars	12
Abb. 2.3.: Schematischer Aufbau des Nachweiszweiges des Tag-RMR-Lidars	13
Abb. 2.4.: Beispiel für eine nächtliche Temperaturmessung	15
Abb. 2.5.: Rayleighsignalprofil, Wirkungen der Techniken zur Untergrundreduzierung	18
Abb. 2.6.: Einer Lidarmessung entnommenes Untergrundsignal	19
Abb. 2.7.: Streurichtung des polarisierten Sonnenlichts	21
Abb. 2.8.: Sonnenstandsänderung im Verhältnis zur Teleskopposition	21
Abb. 3.1.: Schematischer Aufbau des neuen Empfangszweiges des Tag-RMR-Lidars	24
Abb. 3.2.: Polarisation an dielektrischen Schichten.	27
Abb. 3.3.: 3D-Abbildung des Polarisationszweiges vom Strahlteiler bis zur Glasfaser	28
Abb. 4.1.: Zwei Messreihen zur Polarisation des Untergrundes vom 26.10.2010.	31
Abb. 4.2.: Gemessene Polarisationsmaxima in Abhängigkeit von der Zeit.	32
Abb. 4.3.: Polarisationsmessung von detektiertem Laserlicht und Signaluntergrund	34
Abb. 4.4.: Rayleighsignalmessung am 16.06.2010, 2:36 - 4:01 UT	35
Abb. 4.5.: Rayleighsignalmessung am 16.06.2010, ca. 12 -13 UT	37
Abb. 4.6.: Untergrund in Abhängigkeit von der Tageszeit, Polarisatorstellung bei 5°	38
Abb. 5.1.: Fotografie des Polarisationszweiges vom Strahlteiler bis zur Glasfaser	41
Abb. A1.: Änderung des Kaliumgehalts in Abhängigkeit von Höhe und Jahreszeit	Blatt 1
Abb. A2.: Foto einer leuchtende Nachtwolke	Blatt 2
Abb. A3.: Entstehung leuchtender Nachtwolken	Blatt 3

Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1.: Herstellerangaben des verwendeten Polarisators von Melles Griot.....	28
Tab.4.1.: Messbedingungen und Ergebnisse der einzelnen Messreihen.....	33
Tab.4.2.: Polarisationsmessungen - Wirkungsgrad des Polarisators.....	39

Hiermit erkläre ich, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Außerdem erkläre ich, dass sie noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt wurde.