

# Spektrale und zeitliche Variation der Himmelsstrahlung anhand von Spektrometermessungen

#### Bachelor-Arbeit angefertigt am Leibniz Institut für Atmosphärenphysik in Kühlungsborn

von Lucjan Grzegorzewski, geb. am 14. September 1989 in Goslar

 Prüfer : Prof. Dr. Franz-Josef Lübken, Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik, Kühlungsborn
Prüfer und Betreuer: Dr. Michael Gerding, Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik, Kühlungsborn

Rostock, den 30. August 2013

ii

# Inhaltsverzeichnis

1	Einl	eitung	1		
2	The	oretische Vorbetrachtung und verwendete Geräte	3		
	2.1	Sonnenspektrum	3		
	2.2	Aerosol	5		
	2.3	Streu- und Absorptionsprozesse in der Atomsphäre	5		
		2.3.1 Rayleigh-Streuung	6		
		2.3.2 Aerosol-Streuung	8		
		2.3.3 Raman-Streuung	9		
		2.3.4 Resonanzabsorption	9		
	2.4	Geräte	10		
		2.4.1 HR4000 High-Resolution Spectrometer	10		
		2.4.2 Rayleigh-Mie-Raman-Lidar des IAP	11		
3	Zeitliche Variation des Himmelsspektrums 15				
	3.1	Himmelsspektrum	15		
	3.2	Tagesverlauf des Himmelsspektrums	16		
	3.3	Abhängigkeit der Intensität bei 532nm vom Sonnenstand und/oder Ta-			
		geszeit	18		
	3.4	Allgemeine Sonnenstandsabhängigkeit	19		
	3.5	Spektrale Variation	21		
4	Abso	chätzung des Lidaruntergrunds und der Lidarmessqualität	25		
	4.1	Wellenlängenverhältnisse als Indikator für die Qualität der Lidar-Messunge	en 26		
	4.2	Intensität bei 532nm als Indikator für die Qualität der Lidar-Messungen	28		
	4.3	Vergleich beider Methoden	29		
5	Zusammenfassung und Ausblick 31				

6 Zusammenfassung und Ausblick	33
Literaturverzeichnis	37

# Kapitel 1

### Einleitung

Die Erdatmosphäre beeinflusst das Leben auf der Erde stark. Ihre Bestandteile (Aerosol), die Dichteverteilung von Gasen und ihre Temperaturen, bilden Bedingungen auf der Erde, die das Überleben ermöglichen. Doch die Atmosphäre ist ein komplexes dynamisches System und ihr Verständnis ist von fundamentaler Wichtigkeit.

Das RMR-Lidar (Light Detection And Ranging), des Leibniz-Instituts für Atmosphärenphysik in Kühlungsborn, beschäftigt sich mit der Erforschung der Atmosphäre. Ein Lidar strahlt ein Signal in die Atmosphäre und analysiert das zurückgestreute Signal. Die Lidar-Messqualität verändert sich mit dem Aerosol, da das Lidarsignal durch Streuprozesse an dem Aerosol entsteht, andererseits aber auch durch Aerosole geschwächt werden kann. Die Streuprozesse am Aerosol finden auch bei solarer Strahlung statt. Das gestreute Sonnenlicht beschreibt das Himmelsspektrum. Die Analyse des Spektrums gibt Auskunft über das Aerosol und somit auch über die Lidar-Messbedingungen.

Die Arbeit behandelt, ob und wie die Analyse des Himmelsspektrums eine Einschätzung der Lidar-Messqualität liefern kann. Die visuelle Einschätzung ist nicht immer einfach. Wolken stören das Lidarsignal. Sie können gut entdeckt und zur Einschätzung der Lidar-Messbedingungen berücksichtigt werden. Doch Streuprozesse finden auch an Teilchen statt, die so klein sind, dass sie kaum oder gar nicht mit dem bloßen Auge zu erkennen sind. Sie beeinflussen dennoch die Lidar-Messqualität. Über einen automatisierten Prozess, anhand von Spektrometermessungen, könnte eine Einschätzung erfolgen. Es würde dem Lidaristen ermöglichen, die Lidar-Messbedingungen im vorhinein gut einschätzen zu können, ohne erst das Lidar einzuschalten. Die Einschätzung könnte in Zukunft Teil eines Systems der automatischen Initialisierung, Überwachung und Beendigung von Lidarmessungen sein. Die Arbeit beginnt mit einer Vorbetrachtung der theoretischen Grundlagen, die für das Verständnis des Himmelsspekrum notwendig sind, und mit einer Vorbetrachtung der verwendeten Geräte.

Im anschließendem Kapitel über die zeitliche Variation des Himmelsspektrums werden Grundlagen erarbeitet, auf denen im darauf folgendem Kapitel bei der Entwicklung von Methoden zur Einschätzung der Lidar-Messqualität zurückgegriffen wird. Es werden die Einflüsse der zeitlichen Variation und somit auch die Einflüsse der Sonnenstände auf das Himmelsspektrum analysiert.

Die Qualität von Lidar-Messungen wird maßgeblich den Aerosolgehalt der Atmosphäre bestimmt. Deshalb wird ein Zusammenhang zwischen dem Aerosol und den Verhältnissen verschiedener Spektrometerbereiche vorgestellt.

Im letzten Kapitel werden zwei Methoden zur Einschätzung der Lidar-Messqualität erarbeitet.

## **Kapitel 2**

# Theoretische Vorbetrachtung und verwendete Geräte

In der Vorbetrachtung werden die theoretischen Grundlagen, die für das Verständnis des Himmelsspekrum notwendig sind, diskutiert und die verwendeten Geräte aufgelisten. Es wird zunächst auf das Sonnenspektrum eingegangen, da die Himmelsstrahlung hauptsächlich aus Streuprozessen der Sonnenstrahlung resultiert. Diese finden in der Atmosphäre an dem sogenantem Aerosol statt. Dieses und die unterschiedlichen Streuprozesse werden im Anschluss diskutiert.

Die Arbeit ist auf der Grundlage von Spektrometermessungen des Himmels entstanden. Der Aufbau und die Funktionsweise des Spektrometers werden in der Vorbetrachtung beschrieben. Des weiteren ist ein Bestandteil der Arbeit ein Vergleich der Spektrometermesswerte mit den Messwerten des RMR-Lidars am Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik in Kühlungsborn. Deshalb wird auch der grobe Aufbau und die Funktionsweise des Lidars vorbetrachtet.

#### 2.1 Sonnenspektrum

Um das Himmelsspektrum zu verstehen, ist die genauere Analyse des Sonnenspektrums notwenig, da das Himmelsspektrum seinen Ursprung in Streuprozessen des Sonnenspektrums, in der Atmosphäre, findet. Spezifische Minima, die Fraunhoferlinien oder Absorptionsbereiche, finden sich in beiden Spektren wieder. Bereits bei dem Austritt des Lichts aus der Sonnenatmosphäre, werden einige Wellenlängen absorbiert oder gestreut. Das bei der Erde ankommende extraterrestrische Sonnenspektrum (Abb.2.1), wird durch einen Schwarzen Strahler, bei einer Temperatur von 5900K, angenähert.



Abbildung 2.1: Sonnenspektrum oberhalb der Atmosphäre und auf der Erde im Vergleich mit einem idealen Schwarzen Körper.[3]

Die spektrale Verteilung eines Schwarzen Strahlers, wird mit dem Planckschen Strahlungsgesetz beschrieben und das Intensitätsmaximum, bei  $\approx 500nm$ , resultiert aus dem Wienschen Verschiebungsgesetz. Bei dem Vergleich des extraterrestrischen Sonnenspektrums mit dem terrestrischen Spektrum ist zu erkennen, dass ein Teil der Strahlung in der Atmosphäre gestreut oder absorbiert wird. Besonders deutlich sind Absorptionen und Streuung bei ultravioletter bis blauer Strahlung zu erkennen. Ein Absorber der energiereichen ultravioletten Strahlung, ist das Molekül Ozon  $O_3$ . Dieser Absorptionseffekt erklärt die Schutzfunktion der Ozonschicht. Beide Spektren unterscheiden sich zusätzlich in linienförmigen Minima, den Fraunhoferlinien. Diese können als Indikatoren für die Zusammensetzung der solaren Atmosphäre betrachtet werden. Neben den Absorptionen verursacht Streuung eine sich stetig ändernde Differenz der beiden Spektren. Die Streuung ist stark wellenlängenabhängig, so dass kurze Wellenlängen stärker gestreut werden. Dies hat die blaue Farbe des Himmels zur Folge. Die Streuungen und Absorptionen werden im Kapitel über die Streuprozesse der Atmosphäre weiter vertieft.

#### 2.2 Aerosol

In dieser Arbeit wird das Aerosol als die Gesamtheit aus einem Gemisch aus Gasen und flüssigen oder festen Teilchen, den sogenannten Aerosolteilchen, betrachtet. Die Erdatmosphäre besteht aus einem stark verdünnten Aerosol. Es ist Teil eines komplexen dynamischen Systems unserer Atmosphäre und kann aus sehr vielen unterschiedlichen Teilchen bestehen und bei verschiedenen Prozessen entstanden sein. An der Erdoberfläche kann, z.B. durch Reibung oder auch durch natürlichen Zerfall, Mineralstaub entstehen. Seesalzaerosol kann durch Gischt, dem zerstäuben von Meerwasser entstehen. Organische Teilchen wie Pollen, Bakterien und Viren oder auch Verbrennungsprodukte können aufgewirbelt werden und in der Atmosphäre das Aerosol bilden. Auch die Kondensierung oder Resublimation aus übersättigten Gasen bildet flüssige Aerosolteichen. Das Aerosol variieren örtlich und zeitlich stark. Mit steigender Höhe nimmt die Aerosolteilchenkonzentration ab. Ab einer bestimmten Luftfeuchtigkeit kondensiert Wasser an den Aerosolteilchen. Die Wassertröpfchen wachsen mit steigender Luftfeuchtigkeit, was zur Wolkenbildung führt. An dem Aerosol finden unterschiedliche Arten von Streuung statt, die im Anschluss diskutiert werden. Im Anschluss wird unter anderem auf die Aerosol-Streuung eingegangen, wobei darauf zu achten ist, dass sie nicht die gesamte Streuung am Aerosol beschreibt. Alle im nachfolgendem beschrieben Streuprozzese finden am Aerosol statt. Die Streuung der solaren elektromagnetischen Strahlung am Aerosol, lässt das Himmelsspektrum entstehen.

#### 2.3 Streu- und Absorptionsprozesse in der Atomsphäre

Das Himmelsspektrum kann tagsüber stark variieren. Bei einem Sonnenuntergang färbt sich der Himmel ins rötliche und an einem klaren Tag nimmt der Himmel verschiedene Blautöne an, wobei er in der Nähe der Sonne heller erscheint, als am Zenit. Verantwortlich für das Himmelsleuchten ist die Streuung des Sonnenlichts am Aerosol. Die Variation des Himmelsspektrums hängt von der Orientierung der Sonne und vom Aerosol ab. Die Streuprozesse in der Atmosphäre, können in elastische und unelastische Streuung kategorisiert werden. Elastische Streuung beschreibt die Streuung ,bei der sich die kinetische Energie, der beim Streuvorgang wechselwirkenden Teilchen, in der Summe nicht ändert. Bei der elastischen Streuung verändert sich die Frequenz praktisch nicht. Bei der unelastischen Streuung kann ein Teil der Energie zur Anregung von höheren Zuständen verwendet werden.

#### 2.3.1 Rayleigh-Streuung

Die Rayleigh-Streuung beschreibt eine elastische Streuung an Teilchen, die relativ zur gestreuten Wellenlänge  $\lambda$  der elektromagnetischen Strahlung klein sind. Das Spektrum des sichtbaren Lichts befindet sich zwischen Wellenlängen von 400nm-700nm. Für die Größe von Teilchen an denen Rayleigh-Streuung stattfindet gilt:

$$r \ll \lambda \tag{2.1}$$

Hieraus folgt, für Wellenlängen die im sichtbaren Spektrum liegen, ein Radius von  $r \ll 400nm$  für die Teilchen, an denen Rayleigh-Streuung stattfindet. In der Atmosphäre wird dies hauptsächlich von Molekülen oder ansatzweise auch schon bei sehr kleinen Teilchen (z.B. Dunst) erfüllt. Der Streuwirkungsquerschnitt  $\sigma_s$  ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit der Wechselwirkung zwischen einer elektromagnetischen Welle und einem Teilchen.

$$\sigma_s = \frac{2\pi^5}{3} \frac{r^6}{\lambda^4} \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2}\right)^2 \tag{2.2}$$

Wobei *d* der Durchmesser des Teilchens ist, *n* ist der Brechungsindex des Teilchens und  $\lambda$  ist die Wellenlänge des gestreuten Lichts. Bei der Rayleigh-Streuung ist der Wirkungsquerschnitt antiproportional zur biquadratischen Wellenlänge  $\sigma_s \propto \lambda^{-4}$ . Dies hat eine stärkere Streuung bei geringeren Wellenlängen zur Folge. Die kurzwelligen Photonen werden in der Atmosphäre stärker gestreut und deshalb erscheint der Himmel blau. Bei der Abendröte wird das kurzwellige Licht häufiger aus seiner Bahn zwischen Sonne und Auge gestreut und so überwiegen die relative Intensitäten der größeren Wellenlängen und die Sonne erscheint rötlich. Die Streuintensität wird beschrieben durch:

$$I = \frac{T_0}{R^2} \cdot \frac{1 + \cos^2\theta}{2} \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^4 \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2}\right)^2 \left(\frac{d}{2}\right)^6$$
(2.3)

Hierbei ist  $T_0$  die einfallende Intensität, R ist der Abstand zum Teilchen und  $\theta$  ist der Streuwinkel senkrecht zur Strahlungsrichtung eines nicht wechselwirkenden Lichtstrahls. Die Streuwahrscheinlichkeit ergibt sich zu  $I/I_0$ . Sie ist schematisch in Abb.2.2 dargestellt. Die Strahlung wird bevorzugt in und entgegen der Strahlungsrichtung gestreut. Aus der Streuwinkelbeziehung folgt, dass der dunkelste Bereich des Himmels,



Abbildung 2.2: Rayleigh-Streuwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit vom Streuwinkel. Die Strahlung wird bevorzugt in und entgegen der Strahlungsrichtung gestreut [2]

der Ort senkrecht zur Strahlungsrichtung der Sonne ist. Der wahre dunkelste Bereich berücksichtigt die Teilchendichte in einem Winkelelement. Diese ist im Zenit am geringsten und steigt in Richtung des Horizonts. Die Streuwahrscheinlichkeit aus einem Winkelelement steigt mit der Teilchenzahl pro Winkelelement und deshalb verursacht der Effekt, dass der Himmel im Zenit am dunkelsten sein sollte und zum Horizont hin heller wird. Die beiden Effekte, verursacht durch die Streuwinkelbeziehung und die Teilchendichte im Winkelelement, überlagern sich und der dunkelste Ort des Himmels befindet sich zwischen dem Zenit und dem Ort senkrecht zur Sonneneinstrahlungsrichtung.

#### 2.3.2 Aerosol-Streuung

Die Aerosol-Streuung beschreibt die allgemeine Streuung von elektromagnetischen Wellen an Teilchen im Größenordnungsbereich der Wellenlänge der gestreuten Photonen ( $d \approx 500 nm$ ). Mit zunehmender Größe der Teilchen, an denen elektromagnetische Wellen gestreut werden, geht die Rayleigh-Streuung über die Aerosol-Streuung in die klassische Streuung über. Auch die Aerosol-Streuung ist eine elastische Streuung, die jedoch nur gering von der Wellenlänge des gestreuten Lichts abhängt. Die Winkelbeziehung der Aerosol-Streuung kann nicht allgemeingültig beschrieben werden, weil die Teilchen, an denen Aerosol-Streuung an sphärischen Teilchen wird Mie-Streuung genannt. Bei sphärischen Teilchen wird die Winkelabhängigkeit der Streuung in Abb. 2.3 dargestellt. I.d.R. findet die Streuung in Vorwärtsrichtung statt, mit einem kleinen



Abbildung 2.3: Mie-Streuwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit vom Streuwinkel bei bestimmter Teilchen Größe. Die Strahlung wird bevorzugt in Strahlungsrichtung gestreut. [2]

seitlichen und rückwärtigen Anteil. Die Anteile verändern sich mit steigender Größe der Partikel. Diese Streuung bewirkt den hellen Schein um die Sonne.

#### 2.3.3 Raman-Streuung

Die Raman-Streuung ist eine unelastische Streuung von Licht an Molekülen oder Atomen, aber auch Kristallen. Die unelastische Streuung beschreibt, anders als bei der Aerosol- oder Rayleigh-Streuung, eine Energieübertragung zwischen dem gestreuten Photon und den wechselwirkenden Teilchen. Die Streuung wird unterteilt in Photonen die Energie abgeben, die Stokes-Raman-Streuung, und den umgekehrten Effekt, die Anti-Stokes-Raman-Streuung. Es können bei Atomen oder Molekülen Rotationsund Vibrationsniveaus angeregt werden und in Kristallen Phononen erzeugt werden. Das resultierende Photon besitzt nach dem Streuprozess eine größere Wellenlänge. Der umgekehrte Effekt wird als Anti-Stokes-Raman-Streuung bezeichnet. Angeregte Zustände geben Energie an ein Photon ab, was in einer geringeren Wellenlänge, nach dem Streuprozess, resultiert. Die Raman-Frequenzverschiebung zwischen dem eingestrahlten und gestreuten Photon ist materialspezifisch.

$$\Delta E_{Raman} = h \cdot \Delta \nu_{Raman} \tag{2.4}$$

Bei Lidarmessungen ermöglicht diese Eigenschaft die Bestimmung von Atmosphärenbestandteilen. Der Streuquerschnitt für die Raman-Streuung ist teilchenabhängig.

#### 2.3.4 Resonanzabsorption

Resonanzabsorption beschreibt die besondere Sensibilität für Photonenabsorption durch Moleküle oder Atome, den Resonatoren, wenn sie von elektromagnetischen Wellen, mit einer Eigenfrequenz des Resonators, angeregt werden. Dabei wird die Energie überwiegend in Wärme umgewandelt. Die Resonanzabsorption (bzw. -Streuung) hat im Vergleich zu der Rayleigh-Streuung einen deutlich höheren Wirkungsquerschnitt. Bei der Entfernung der Photonenfrequenz von der Eigenfrequenz des Resonators, sinkt der Wirkungsquerschnitt. Die teilchenspezifische Absorption ermöglicht die Analyse von Bestandteilen eines Gemisches (z.B. Atmosphäre).

#### 2.4 Geräte

#### 2.4.1 HR4000 High-Resolution Spectrometer



Abbildung 2.4: Aufbau des Ocean Optics HR4000 Spektrometers. Abbildung aus der Betriebsanleitung des HR4000 Spektrometers [1]

Der HR4000 Spektrometer von Ocean Optics ist ein Reflexionsgitterspektrometer. In Abb.2.4 ist der Aufbau des HR4000 Spektrometers und der optische Weg, des über eine Glasfaser eingekoppelten Lichtspektrums, dargestellt. Die Einkopplung findet über den SMA Connector statt (Abb.(2.4), Objekt 1). Anschließend wird die Strahlintensität und Auflösung durch eine Lochblende reguliert (Objekt 2). Ein Wellenlängenfilter transmittiert einen ausgewählten Wellenlängenbereich (Objekt 3). Danach wir der Strahl mit einem Spiegel (Objekt 4) auf ein Reflexionsgitter (Objekt 5) fokussiert. An den Gitterspalten wird der Lichtstrahl gebeugt, so dass die Strahlen mit sich selber interferieren und ein Interferenzmuster erzeugen. Die Position der Maxima ist wellenlängenabhängig. Dies hat eine spektrale Aufspaltung des Strahls ähnlich der Aufspaltung an einem Prisma zur Folge. Mithilfe eines weiteren Spiegels (Objekt 6), wird das Licht auf den CCD Detektor (Objekt 8) fokussiert. Objekt 7 ist eine optionale Komponente. Es handelt sich um eine fokussierende Linse, die das Licht auf die Größe des CCD-Detektors fokussiert. Der CCD Detektor wandelt das Lichtsignal in ein elektrisches Signal um. Der HR4000 Spektrometer ist auf absolute Intensitäten, in  $\mu W/cm^2/nm$ , kalibriert.Er würde für die Messung des Himmelsspektrum verwendet.

#### 2.4.2 Rayleigh-Mie-Raman-Lidar des IAP



Abbildung 2.5: Schematischer Aufbau des Lidarprinzips am Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik in Kühlungsborn [4].

Das RMR-Lidar am IAP in Kühlungsborn beschäftigt sich mit der höhenabhängigen Temperatur- und Dichtemessung der Atmosphäre. Messungen sind sowohl bei Tag als auch bei Nacht möglich. In Abb. 2.5 ist das Funktionsprinzip schematisch dargestellt. Es basiert auf dem Aussenden eines gepulsten Lasersignals und der Analyse des zurück gestreuten Lasersignals. Durch die unterschiedlichen Laufzeiten von gestreutem Licht in verschiedenen Höhen, kann ein Höhenprofil erstellt werden. Die Sendeeinheit des RMR-Lidars bildet ein Nd:YAG-Laser. Er wird durch Blitzlampen und eine Güteschaltung gepumpt und gepulst. Es wird die Wellenlänge von 1064nm emittiert. Mithilfe von Frequenzverdopplung und Frequenzverdreifachung strahlt der Laser zusätzlich die erste Harmonische bei 532nm und zweite Harmonische bei 355nm ab. Ein Empfangsteleskop erfasst die zurückgestreuten Laserpulse. Bei der Analyse, wird im Nachweiszweig, das Signal in verschiedene Wellenlänge von 532nm analysiert. Dieser Zweig dient zur Temperaturbestimmung. Ein weiterer Zweig untersucht die inelastische Raman-Streuung bei einer Wellenlänge von 608nm. Hiermit kann die Stickstoffdichte in verschiedenen Atmosphärenhöhen bestimmt werden, ohne von der elastischen Streuung an Aerosolen beeinflusst zu werden.

#### Störsignale

Der Lidar kann nur messen, wenn keine Wolken den Laserplus an dem Eindringen in die höhere Atmosphäre hindern, oder Streuprozesse das Lidarsignal zu stark abschwächen. Die am Detektor registrierten Signale können natürlichen oder künstlichen Quellen entstammen oder technisch begründet werden. Der Detektor besitzt eine Dunkelzählrate. Sie ist eine technisch bedingte geringe Signalgröße, die auch bei völliger Dunkelheit registriert wird. Das Sternleuchten oder künstliches Licht der Stadt, kann in den Detektor gestreuut werden. Tagsüber wird zusätzlich zum Streusignal des Laserlichts auch das gestreute Sonnenlicht am Aerosol aufgezeichnet. Alle Signale, die nicht dem gestreuten Laserlicht und der Dunkelzählrate entstammen, werden Untergrundsignal genannt und sind Störsignale und eine systematische Fehlerquelle. Mit der Laufzeitmessung kann das Rückstreuprofil bis 200 km aufgenommen werden. Doch der geringe Wirkungsquerschnitt bei Rayleighstreuung, führt zu einem verschwindenden Signal ab einer Höhe von 100 km. Das Signal ab 100km ist höhenunabhängig und



Abbildung 2.6: Tagesverlauf des Untergrundsignals des RMR-Lidars am 7.6.2013 am Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik in Kühlungsborn

gibt den Untergrund an. Mit steigendem Sonnenstand wird durch die in vorherigen Abschnitten beschriebene Winkelbeziehung der Rayleigh- und Aerosol-Streuung ein höheres Untergrundsignal registriert. Der Tagesverlauf des Untergrundsignals (Abb. 2.6) gemessen am 7.6.2013 am IAP in Kühlungsborn, weißt einen bis zur Mittagszeit steigenden Untergrund auf und ab der Mittagszeit sinkt das Untergrundsignal wieder ab. Die Untergrundsintensität verändert sich um mehrere Größenordnungen während des Sonnen-Aufgangs und Untergangs. Die Intensität wird in Photonen bzw. Herz angegeben.

## Kapitel 3

# Zeitliche Variation des Himmelsspektrums

Im Zusammenhang mit den RMR-Lidarmessungen wird das Himmelsspektrums für ein besseres Verständnis des Untergrundsignals analysiert. Der Untergrund resultiert aus der Himmelsstrahlung bei der Wellenlänge von 532nm und deshalb wird das Himmelsspektrum intensiver in dem Wellenlängenbereich um 532nm untersucht. Der Tagesverlauf des Himmelsspektrums wird diskutiert, um die Eigenschaften unterschiedlicher Sonnenhöhenstände zu erarbeiten. Im dritten Kapitel werden zwei Methoden zur Auswertung von Spektrometermessungen erarbeitet, um mit ihrer Hilfe die Lidar-Messbedingungen abzuschätzen. Die erste Methode basiert auf den unterschiedlichen Eigenschaften von verschiedenen Bereichen des Himmelsspektrums. Bei der zweiten Methode wird die sonnenstandsabhängige minimale Untergrundsignalstärke abgeschätzt und die Wellenlänge von 532nm wird als Indikator für den Untergrund verwendet. Die Grundlagen für beide Methoden werden in diesem Kapitel erarbeitet.

#### 3.1 Himmelsspektrum

Für ein besseres Verständnis des Untergrunds wird zunächst ein Himmelsspektrum aufgenommen und diskutiert (Abb.3.1). Die höchste Intensität besitzt das Himmelsspektrum beim blauen Licht im Wellenlängenbereich zwischen 400nm-500nm. Die absolute Intensität muss jedoch mit Vorsicht als Indikator für die optisch wahrgenommene Farbe betrachtet werden, da das menschliche Auge unterschiedlich sensibel auf verschiedene Wellenlängenbereiche reagiert. Das Himmelsspektrum weißt, die in der Vor-



Abbildung 3.1: Himmelsspektrum aufgenommen am 7.6.20013 um 11:08 UT am IAP in Kühlungsborn

betrachtung diskutierten Minima, auf Grund von Resonazabsorption durch bestimmte Gase und auf Grund der Fraunhoferlinien, auf. Diese sind auch im Sonnenspektrum wiederzufinden. Das gestreute Himmelsspektrum passiert die selben atmosphärischen Gasschichten wie das direkte Sonnenlicht und hat somit, die auf Grund von Rensonanzabsorption und Raman-Streuung, spezifischen Minima.

#### 3.2 Tagesverlauf des Himmelsspektrums

Der RMR-Lidar am IAP detektiert und analysiert den Untergrund aus dem Signal der Wellenlänge von 532nm. Damit die Spektrometermessungen mit dem Lidarsignal verglichen werden können, wird das Himmelsspektrum bei der Wellenlänge von 532nm untersucht. Dabei wurde der Durchschnitt der Spektrometermesswerte von 530,10nm - 534,05nm gebildet, um ein Referenzwert zum Lidaruntergrund zu erhalten. Dieser Messwert wird im weiterem Verlauf als die Intensität bei 532nm bezeichnet. Im Folgendem werden die Messwerte eines Tagesverlaufs diskutiert. Es wurde eine Spektrometermessreihe am 7.6.2013 zwischen 7:51 UT - 16:30 UT aufgenommen. Die Spektrometermesswerte sind auf eine absolute Intensität  $\mu W/cm^2/nm$  kalibriert worden. Die Kurve der Intensität bei 532nm und die Kurve des Untergrunds (Abb. 3.2) wei-



Abbildung 3.2: Untergrund im Lidarsignal im Vergleich mit gleichzeitig gemessenem Mittelwert der Intensität zwischen 530,10nm-534,05nm aus Spektrometermessungen.

sen einen ähnlichen Verlauf auf. Von Morgens bis Mittags steigt der Untergrund durch die Sonnenhöhe an. Gegen Abend sinken beide Kurven ab. Die sehr gute Übereinstimmung der Kurven zeigt, dass die Intensität bei 532nm sich als Untergrundsindikator eignet. Das Himmelsspektrum wurde im Zenit aufgenommen. Wenn sich die Sonne dem Zenit nähert, wird der Himmel im Zenit heller. Dies liegt an den Winkelabhängigkeiten der Streuungen. Diese wurden in der Vorbetrachtung diskutiert. Bei der Rayleigt- und Aerosol-Streuuung wird die Strahlung bevorzugt in Einstrahlungsrichtung gestreut. Bei einem hohen Sonnenstand hat die Strahlung, die im Zenit gemessen wurde, durch Streuung ihre Richtung nur geringfügig geändert. Die winkelabhängige Streuwahrscheinlichkeit führt zu einer erhöhten Intensität der Spektrometermessungen bei 532nm zur Mittagszeit bei einem hohen Sonnenstand.

Die Abweichung der Kurvenverläufe können durch die Abweichung des Mittelwerts von 530,10nm-534,05nm mit dem reellen Wert bei 532nm entstehen. Es können vereinzelnde Wolken nur bei jeweils einem der Vergleichswerte einen Unterschied hervorgerufen haben und das betrachtete Sichtfeld kann unterschiedlich groß sein. Restfeuchte auf dem Teleskop kann das Sichtfeld vergrößern. Weitere Abweichungen der Intensität bei 532nm und des Untergrunds können durch unterschiedliche Messzeitpunkte entstanden sein.

### 3.3 Abhängigkeit der Intensität bei 532nm vom Sonnenstand und/oder Tageszeit

Im vorherigen Abschnitt wurde die Abhängig der Intensität bei 532nm und der Zusammenhang zum Untergrund bei verschiedenen Tageszeiten diskutiert. Doch die Tageszeiten werden durch verschiedene Sonnenstände bestimmt. Im folgendem Abschnitt wird der Einfluss der Sonnenhöhe auf die Intensität bei 532nm untersucht. Es wird ein Verständnis der sonnenstandsabhängigen Intensität erarbeitet. Dies soll eine Grundlage für die Abschätzung einer sonnenhöhenabhängigen minimalen Intensität bei 532nm liefern und über den direkten Bezug zum Untergrund auch eine Abschätzung des sonnenhöhenabhängigen minimalen Untergrunds ermöglichen. Hieraus soll eine Abschätzung der Lidarmessqualität erfolgen.

Es wird nun der Einfluss der Sonnenhöhe auf das Himmelsspektrum genauer untersucht. Mit der Sonnenhöhe ist der Winkel zwischen dem Horizont und der Sonne gemeint ( $\phi_{sonne} = 90^\circ - \phi_{Zenit}$ ). Die Sonnenhöhenwerte wurden der Internetseite http: //www.volker-quaschning.de/datserv/sunpos/index.php entnommen. Auf der Seite wurde der Breitengrad 54.12° und der Längengrad 11.77° eingesetzt. Das Wetter war an dem Tag der Spektrometermessungen konstant klar und es waren keine Änderungen (Dunst, Wolkenbilung) zu beobachten.



Abbildung 3.3: Der Tagesverlauf des Sonnenstands am 7.6.2013 und die Intensität des Himmelspektrums bei der Wellenlänge von 532nm.

Abb. 3.3 weißt ein Zusammenhang zwischen dem Sonnenstand und der Intensität auf. Bei steigender Sonnenhöhe nimmt die Intensität bei 532nm zu. Diese Beziehung hängt mit der im Vorfeld diskutierten winkelabhängigen Rayleigh-Streuung und Aerosol-Streuung zusammen. Dennoch wäre zu erwarten, dass die Intensität gleichmäßig vormittags und nachmittags zu und wieder abnimmt. Das Maximum der Intensität befindet sich erst nach dem Zeitpunkt des Sonnenhöchststands. Eine Veränderung des Aerosols während des Tages kann die Verschiebung der Intensität erklären. So kann Aerosol durch zunehmende Konvektion in Höhen größerer Luftfeuchtigkeit gelagen und aufquellen oder der Aerosolgehalt steigt durch zunehmende Luftverwirbelung und eine dichter werdende planetare Grenzschicht an. Dies hätte eine Erhöhung der Aerosol-Streuung zur Folge und eine Verformung der Kurve.

Der Abbschnitt zeigt, dass eine starke Abhängigkeit der Intensität vom Sonnenstand, mit Modulation durch Aerosole, existiert. Der Zusammenhang ist nicht linear, da bei geringen Sonnenhöhen die Intensität geringer steigt/sinkt als die Sonnenhöhe und bei höheren Sonnenständen steigt/sinkt die Intensität stärker als die Sonnenhöhe.

#### 3.4 Allgemeine Sonnenstandsabhängigkeit

Im Folgendem wird der verallgemeinernde Fall des vorherigen Abschnitts betrachtet. Es soll eine sonnenhöhenabhängige Intensität bei klaren Wetterbedingungen erarbeitet werden. Der Abschnitt legt die Grundlage für die im nachfolgendem Kapitel entwickelte Methode zur Einschätzung des Lidar-Messqualität. Die Änderung des Lidar-Untergrunds mit dem Sonnenstand ist einerseits groß und andererseits auch unvermeidlich. Doch bei konstanten Wetterbedingungen (klarer Himmel) ist die Änderung einschätzbar. Deshalb soll dieser Effekt möglichst rausgerechnet werden, um nur noch eine vom Aerosolgehalt abhängige Größe zu erhalten, bzw. eine Zahl, die unabhängig vom Sonnenstand ist.

Im Vorfeld wurde eine nicht lineare Beziehung zwischen dem Sonnenstand und der Intensität bei 532nm (also auch dem Untergrund) herausgefunden. Die sonnenhöhenabhängige minimale Intensität bei 532nm bei konstant guten Wetterbedingungen wird im Folgendem untersucht.

Das Himmelsspektrum wird über den Zeitraum vom 25.1.2013 bis 26.7.2013 analysiert. In Abb. 3.4 werden die Spektrometermesswerte bei 532nm über den verschiedenen Sonnenhöhen aufgetragen.



Abbildung 3.4: Intensität der Himmelsstrahlung bei 532nm in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe. Die rosafarbigen Messwerte wurden an dem 7.6.2013 aufgenommen und lassen einen kubischen Verlauf vermuten. Die Messwerte bei klaren Himmel wurden mit einer kubischen roten Funktion angepasst. Das gestrichelt markierte Feld gibt die durch die kubische Funktion bestimmte minimale Intensität bei klarem Himmel an

Die meisten Messpunkte wurden bei einem klaren Himmel aufgenommen. Sie haben eine annähernden linearen Bezug zur Sonnenhöhe. Die Messpunkte bei einer Intensität über  $0,25\mu W/cm^2/nm$  wurden an Tagen mit einem hellerem Himmel aufgenommen. Diese Punkte haben keine Ordnung und liegen verstreut bei unterschiedlichen Winkeln über den Messpunkten, die bei einem klaren Himmel, aufgenommen wurden. In Abschnitt zur Abhängigkeit der Intensität bei 532nm vom Sonnenstand und/oder Tageszeit wurde ein nicht linearer Zusammenhang zwischen der Intensität und der Sonnenhöhe herausgefunden. Um eine Abschätzung des Verlaufs zu machen, werden die Messwerte (Abb.3.4, rosafarbige Punkte) im Tagesverlauf gesondert betrachtet. Diese wurden bei konstanten Wetterbedigungen aufgenommen und liefern somit einen guten allgemeinen Verlauf. Es wird der Tagesverlauf vom hohem Sonnenstand am Mittag und der Abfall gegen Abend betrachtet. Die Messpunkte weisen auf einen kubischen Verlauf hin. Deshalb werden die Messwerte, bei guten Messbedingungen (klarem Himmel) mit einer kubischen Funktion angepasst. Die Funktion wurde mit dem Programm Origin 8.1G angepasst (Parameter siehe Tab. 3.1) und ist in Abb. 3.4 rot dargestellt. Die gestrichelte Fläche wird durch die kubische Funktion eingegrenzt und beschreibt, über den direkten Zusammenhang zwischen der Intensität bei 532nm und dem Untergrundsignal, den minimalen Untergrund bei einem klaren Himmel.

Modell	Cubic			
Gleichung	$T_0(h) = A + B \cdot h + C \cdot h^2 + D \cdot h^3$			
Chi-Quadr Reduziert	4,64E-05			
Kor. R-Quadrat	0,96833			
	Wert	Standardfehler		
А	0,01263	0,01045		
В	0,00353	0,00114		
С	-7,69E-05	3,79E-05		
D	1,02E-06	3,77E-07		

**Tabelle 3.1:** Parameter der kubischen Anpassung. Die sonnenhöhenabhängige minimale Intensität  $I_0(h)$  bei 532nm wird beschrieben.

In dem Abschnitt zur allgemeinen Sonnenstandsabhängigkeit wurde ein Zusammenhang zwischen der Sonnenhöhe und der Intensität bei 532nm während eines klaren Himmels hergestellt und mit der Funktion  $T_0(h)$  angepasst. Diesige Tage kennzeichnen sich durch eine erhöhte Intensität bezüglich der Funktion  $I_0(h)$ .

#### 3.5 Spektrale Variation

In dem Abschnitt soll die Vorarbeit, für die im Kapitel zur Abschätzung des Lidaruntergrunds und Lider-Messqualität erarbeitete Methode, geleistet werden. Die Methode bedient sich der Wellenlängenabhängigkeit der Streuung (Rayleigh-Streuung). Auf Grund von zeitlicher Variation des Aerosols, werden unterschiedliche Bereiche des solaren Spektrum unterschiedlich gestreut. Die Verhältnisse von verschiedenen Bereichen des Himmelsspektrum werden dazu genutzt, um über die Beziehung zum Aerosol, ein Indikator für die Lidar-Messqualität zu erhalten.

Eine Lidarmessung kann immer dann qualitativ ausgewertet werden, wenn das zurückgestreute Lidarsignal eine bestimmte Intensität überschreitet und der Untergrund nicht zu hoch ist. Die Intensität des zurückgestreuten Laserpulses steht im Bezug zum Aerosol. Bei höherer Teilchenkonzentration in der unteren Atmosphäre, wird ein größerer Teil der Intensität des Laserpulses gestreut. Der Laserpuls reicht nicht mehr so weit in die Höhe und das zurückgestreute Signal wird auch durch erneute Streuung und Absorption abgeschwächt. Die Qualität der Lidarmessung hängt hauptsächlich vom Aerosol ab. Das Himmelsspektrum hängt zum Teil vom Aerosol aber auch von dem Sonnenstand ab. Die Einflüsse des Sonnenstands wurden in den vorangegangenen Abschnitten besprochen.



Abbildung 3.5: Zwei Himmelsspektren bei unterschiedlichen Sonnenhöhen aufgenommen am 7.6.2013. Das grüne Spektrum aufgenommen um 16:30 UT bei einer Sonnenhöhe von 24,3° und das schwarzes Spektrum aufgenommen um 11:08 UT bei einer Sonnenhöhe von 58,7°.

In Abb. 3.5 werden zwei Himmelsspektren dargestellt, die am 7.6.2013 bei verschiedenen Sonnenhöhen aufgenommen wurden. Das grüne Spektrum wurde abends um 16:30 UT bei einer Sonnenhöhe von 24,3° aufgenommen. Zur Mittagszeit um 11:08 UT ist der Sonnenstand bei 58,7° und das schwarze Spektrum ist über dem gesamten dargestellten Bereich höher als das grüne Spektrum. Somit steigt das Spektrum bei steigender Sonnenhöhe an. Um ein möglichst sonnenstandsunabhängigen Indikator zu bestimmen, werden im Folgendem Verhältnisse zwischen verschiedenen spektralen Bereichen und dem gesamten Spektrum analysiert. So kompensiert sich ein Teil der sonnenstandsbedingten Intensität.

Es wird nun das Verhältnis zwischen der durchschnittlichen Gesamtintensität und der Intensität bei 532nm über dem Sonnenstand aufgetragen. Hierdurch wird die sonnenstandsunabhängige Variation im Himmelsspektrum veranschaulicht. Die durchschnittliche Gesamtintensität wurde als der Mittelwert der Messwerte zwischen 360,70nm -767,98nm bestimmt.



Abbildung 3.6: Verhältnis zwischen der Intensität bei 532nm und der Gesamtintensität zwischen 360,70nm - 767,98nm aufgetragen über der Sonnenhöhe.

In Abb. 3.6 liegen alle Verhältnisse über dem Wert 1,05. Es findet sich eine Ansammlung von Messwerte zwischen dem Verhältnis von 1,05 und 1,15. Diese Messwerte wurden bei einem klaren Himmel aufgenommen und sie bestätigen unsere Annahme, dass durch das Bilden von Verhältnissen, die bei konstanten Messbedingungen aufgenommen wurden, die Sonnenhöhenabhängigkeit geringer wird. Vereinzelnde Messwerte liegen über dem Verhältnis von 1,15. Diese Messwerte wurden bei einem hellerem Himmel (diesig) gemessen. Die Ausreißer zeigen, dass die Intensität bei 532nm im Verhältnis zur Gesamtintensität an diesigen Tagen stärker ansteigt. Durch Veränderung des Aerosols kann vermehrt Rayleigh-Streuung stattfinden. Bei hellerem Himmel kann es sich um Dunst handeln, das aus bis zu  $0, 1\mu m$  kleinen Teilchen besteht und an denen Rayleigh-Streuung stattfindet. Die Rayleigh-Streuung hat einen höheren Wirkungsquerschnitt bei geringeren Wellenlängen, und so kommt es zu einem relativen Anstieg der Intensität bei 532nm in Bezug zur Gesamtintensität.

Dieser Abschnitt hat eine deutlich geringere sonnenstandsabhängigkeit der Intensitäten des Himmelspektrum durch das Bilden von Verhältnissen bestätigt. Zusätzlich wird die Qualität von Verhältnissen als Indikator für ein klaren Himmel bekräftigt. Ein klarer Himmel ermöglicht Messungen mit einem Lidar.

### Kapitel 4

# Abschätzung des Lidaruntergrunds und der Lidarmessqualität

Eine Lidarmessung kann immer dann qualitativ ausgewertet werden, wenn das zurückgestreute Lidarsignal eine bestimmte Intensität überschreitet und der Untergrund nicht zu hoch ist. Die Intensität des zurückgestreuten Laserpulses steht im Bezug zur Beschaffenheit der Atmosphäre. Bei höherer Teilchenkonzentration in der unteren Atmosphäre wird ein größerer Teil der Intensität des Laserpulses gestreut. Der Laserpuls reicht nicht mehr so weit in die Höhe und die zurückgestreute Intensität wird auch durch erneute Streuung und Absorption abgeschwächt. Die Signalintensität verhält sich antiproportional zum Untergrund. Dies ermöglicht die Abschätzung der Qualität von Lidarmessungen ohne Messwerte der Intensität des Lidarsignals.

Wie im Vorfeld besprochen, existiert ein Zusammenhang zwischen der Intensität im Himmelsspektrum und dem Aerosol. Unterschiedliche Wellenlängenbereiche reagieren wegen der wellenlängenabhängigen Rayleigh-Streuung unterschiedlich auf eine Veränderung der Atmosphäre. Die erste Methode zur Abschätzung der Lidarmessqualität aus Spektrometermessungen wird durch die Untersuchung von Verhältnissen unterschiedlicher Wellenlängenbereiche erfolgen.

Die zweite Methode soll die Intensität bei 532nm als Indikator für den Untergrunds verwenden, wobei die sonnenhöhenabhängige Intensität, ab welcher nicht mehr gemessen werden kann, abgeschätz wird.

### 4.1 Wellenlängenverhältnisse als Indikator für die Qualität der Lidar-Messungen

Um im Vorfeld die Qualität der Lidarmessungen abschätzen zu können, genügt es nicht, nur die Intensität bei 532nm des Himmelsspektrums auf seine absolute Intensität zu analysieren, da das gestreute Lidarsignal stark genug sein kann, um bei hohem Untergrund trotzdem messen zu können. Um ein Indikator für gute Messbedingungen zu erhalten, wird das im Abschnitt zur spektralen Variation diskutierte Bilden von Verhältnissen, verwendet. Es soll ein möglichst sonnenhöhenunabhängigen Wert liefern, da sich die Intensitäten der Sonnenhöhe zum Teil kompensieren. Im Abschnitt zur spektralen Variation wurde die Intensität bei 532nm mit der Intensität des gesamten Spektrums verglichen. Um den Indikator für gute Messbedingungen zu optimieren, wurde über neue Wellenlängenbereiche gemittelt und diese mit den Mittelwerten von anderer Bereiche verglichen.



Abbildung 4.1: Intensität bei 532nm als Indikator für den Untergrund, aufgetragen über dem Verhältnis von zwei Mittelwerten verschiedener Bereiche (grün/blau)(Bereich A: 497,2nm-543,21nm und Bereich B: 400,57nm-412,45nm). Erklärung der Schraffur: siehe Text.

In Abb. 4.1 wurde die Intensität bei 532nm über dem Verhältnis von Bereich A: 497,2nm-543,21nm und Bereich B: 400,57nm-412,45nm aufgetragen. Die Intensität bei 532nm steht im direktem Zusammenhang zum Untergrund. Das Verhältnis, der Bereiche A und B, soll relativ sonnenstandsunabhängig und ein Indikator für gute Messbedingungen sein. Die verschiedenen Punkte stellen einzelne Messungen an verschiedenen Tagen dar. Die rosafarbigen Punkte sind an einem Tag mit klarem Himmel aufgenommen worden (7.6.2013). Sie symbolisieren also eine relativ konstantes Aerosol. Die Messpunkte im oberen rechten Bereich wurden zum Zeitpunkt schlechter Messbedingungen (Dunst, heller Himmel) aufgenommen. Dies lässt sich auch aus der hohen Intensität bei 532nm (hoher Untergrund) und dem hohen Verhältnis, der ein Indikator für die Lidar-Messbedigungen ist, schließen. Die Messpunkte im unterem linken Bereich wurden zum Zeitpunkt guter Messbedingungen aufgenommen. Für die Optimierung der ausgewählten Bereiche A und B, wurde versucht, dass die rosafarbigen Messdaten, die konstante Messbedingungen symboliesieren, ein konstantes Verhältnis einnehmen. Dieses Verhältnis beschreibt die Messbedingungen und diese sollen sich an einem Tag mit konstanten Wetterbedingungen (klarer Himmel) nicht verändern. Das zweite Kriterium, worauf bei der Wahl der Bereiche A und B geachtet wurde, war, dass sich die Punkte im oberen rechten Bereich, mit schlechten Messbedingungen, deutlich von den Messpunkten im unterem linken Bereich abgrenzen. Ein Messzeitpunkt an dem gerade nicht mehr gemessen werden konnte, liegt bei dem Verhältnis V=1,24 vor. Dieses Verhältnis wird als der Wert, ab dem keine Messungen mehr möglich ist, angenommen. Ab dem Verhältnis können Lidarmessungen nur eingeschränkt erfolgen und der Bereich im Diagramm ist rot markiert. Die Ansammlung von Messwerten im unterem linken Bereich wurden bei guten Bedingungen aufgenommen und ermöglichen einwandfreie Lidarmessungen. Dieser Bereich wurde grün markiert. Der dazwischen liegende Bereich wurde orange markiert. Die Farben symbolisieren in welchen Bereich gut (grün), mittelmäßig (orange) und schlecht (rot) gemessen werden kann.

In diesem Abschnitt wurde durch das Bilden vom Verhältnis zwischen dem Bereich A: 497,2nm-543,21nm und Bereich B: 400,57nm-412,45nm ein Indikator für die RMR-Lidar-Messbedingungen entwickelt. Bei dem Verhältnis V=1,24 liegen eingeschränkte Lidar-Messbedingungen vor.

### 4.2 Intensität bei 532nm als Indikator für die Qualität der Lidar-Messungen

Im Folgendem wird eine Methode entwickelt, die durch Messung der Intensität bei 532nm, die Lidar-Messqualität abschätzen soll. Im Abschnitt zur allgemeine Sonnenstandsabhängigkeit wurde die sonnenhöhenabhängige Funktion  $I_0(h)$  der Intensität bei 532nm unter guten RMR-Lidar-Messbedigungen erarbeitet. Um schlechte Messbedingungen einschätzen zu können, werden erhöhte Messwerte bezüglich dieser Funktion analysiert. Konstante Messbedingungen beschreiben ein konstantes Aerosol. Bei Veränderung des Aerosols, wie z.B. Erhöhung der Streuteilchen in der Atmosphäre, erhöht sich die Funktion  $I_0(h)$  zu I(h), die dann den Verlauf bei konstant schlechteren Bedingungen beschreibt. Sie beschreibt also die Messbedingungen bei konstanter aber erhöhter Streuteilchenanzahl in der Atmosphäre. Die kubische Form wird beibehalten, da die Streuintensität mit zunehmender Anzahl von Streuteilchen linear steigt. Eingeschränkte RMR-Lidar-Messbedingungen werden mit einem Wert beschrieben, bei dem ein Aerosol vorliegt, bei dem gerade keine Lidarmessungen durchgeführt werden können. Für den kritischen Wert wird das selbe Himmelsspektrum bei 532nm ausgewertet, welches auch schon im vorangegangen Abschnitt zur Bestimmung des kritischen Verhältnisses verwendet wurde. In Abb. 3.4 ist der Wert bei der Intensität von  $I_b = 0,46\mu W/cm^2/nm$  und der Sonnenhöhe von  $h_b = 49,4^{\circ}$  aufzufinden. Es wird nun die Funktion  $I_0(h)$  bei konstant guten Messbedingungen, auf eine neue Funktion I(h) bei konstant schlechten Messbedingungen normiert.

$$I(h) = I_b \cdot \frac{I_0(h)}{I_0(h_b)}$$
  
=  $(0,047+0,013 \cdot h - 0,26 \cdot 10^{-4} \cdot h^2 + 0,38 \cdot 10^{-5} \cdot h^3) \frac{\mu W}{cm^2} nm$ 

Der Verlauf wird in Abb.4.2 dargestellt.



**Abbildung 4.2:** Intensität der Himmelsstrahlung bei 532nm in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe. Die Messwerte bei klaren Himmel werden mit der roten Funktion  $I_0(h)$ beschrieben. Das gestrichelt markierte Feld gibt die durch die Funktion bestimmte minimale Intensität bei klarem Himmel an. I(h) gibt die Grenzwert an, ab dem stark eingeschränkte Messbedingungen vorliegen

Die Abb. 3.4 wurde durch die Funktion I(h) erweitert. Messwerte der Intensität bei 532nm, die bei bestimmten Sonnenhöhen, über der Funktion I(h) liegen, weisen eingeschränkte RMR-Lidar-Messbedingungen auf.

#### 4.3 Vergleich beider Methoden

Die Methode, die sich der Wellenlängenverhältnisse als Indikator für die Qualität der Lidar-Messungen bedient, hat den Vorteil, dass die sonnenstandsbedingte Intensität nicht zusätzlich betrachtet werden muss. Dies würde eine praktische Realisierung vereinfachen. Jedoch ist auch zu beachtet, dass verschiedene Bereiche des Himmelsspektrums unterschiedlich auf Veränderungen der Sonnenhöhe reagieren. Somit gilt die Sonnenhöhenunabhängigkeit nur grob. Optimierungsmöglichkeiten liegen bei der Wahl der Bereiche. Die Methode, die sich der Intensität bei 532nm als Indikator für die Lidar-Messbedingungen bedient, hat den Vorteil, des direkten Bezugs der Intensität bei 532nm zum Untergrund. Hierdurch können sehr präzise Untergrundsvorhersagen getroffen werden. Die Abschätzung der sonnenstandsbedingten minimalen Intensität  $I_0(h)$  wurde fehlerbehaftet kubisch angepasst. Die Fehler pflanzen sich auf die Funktion zur Einschätzung von schlechten Bedingungen fort und werden sogar noch verstärkt. Optimiert könnte die Methode durch eine bessere Funktion  $I_0(h)$  der sonnenstandsabhängigen minimalen Intensität. Bei der praktischen Realisierung einer automatischen Einschätzung der Lidar-Messqualität, müsste zusätzlich der aktuelle Sonnenstand miteinbezogen werden. Eine Einschätzung welche Methode bessere Ergebnisse liefert ist schwer möglich.

# Kapitel 5

### **Zusammenfassung und Ausblick**

Die Arbeit befasst sich mit der Variation von elektromagnetischer Strahlung im Himmelsspektrum. Es wurde die Variation des Spektrums durch zeitliche bedingte Veränderung des Sonnenstands und durch Veränderung des Aerosols im genauerem untersucht. Die Erkenntnisse ermöglichten die Erarbeitung von zwei Methoden zur Einschätzung der RMR-Lidar-Messqualität anhand von Messungen mit dem Spektrometer. Die Arbeit zeigt, dass eine Einschätzung der RMR-Lidar-Messqualität möglich ist. Die Methoden könnten in Zukunft bei der Einschätzung helfen, ob zum Messzeitpunkt Bedingungen vorherrschen, die Lidarmessungen qualitativ auswertbar machen. Die Qualität der Lidarmessungen könnte auch ohne einer Anwesenheit am Messort eingeschätz werden. Über einen automatisierten Vorgang könnte in Zukunft jederzeit eine Einschätzung der Lidar-Messqualität erfolgen. Nach der Validierung der Methode könnten Messungen automatisch initialisiert, überwacht und gegebenenfalls abgebrochen werden. Eine Optimierung der RMR-Lidar-Messung hätte eine erhöhte Ausbeute von auswertbaren Daten und die Reduzierung des Lidar-Verschleißes (z.B. Blitzlampen) zur Folge.

### Literaturverzeichnis

- [1] Ocean Optics:HR4000 / HR4000CG-UV-NIR. Installation and Operation Manual. www.oceanoptics.com/technical/hr4000.pdf, [Document Number:210-00000-000-02-0908]
- [2] Universität München. http://www.geographie.uni-muenchen.de/ internetvorlesung/physik/wechselwirkung\_streuung.htm, . - [Online; accessed 16-August-2013]
- [3] DEGREEN; QUILBERT: Sonne Strahlungsintensitaet. http://commons.wikimedia. org/wiki/File:Sonne\_Strahlungsintensitaet.svg, 2007. – [Online; accessed 16-August-2013]
- [4] RAUTHE, M. : Lidarmessungen von Temperaturen und Schwerewellen zwischen 1 105 km über Kühlungsborn (54°N, 12°O), Universität Rostock, dissertation, 2008

### Selbständigkeitserklärung

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

Rostock, (Datum)