

DIPLOMARBEIT

am Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik in Kühlungsborn
an der Universität Rostock

Erweiterung und Optimierung der Datenerfassung des ALOMAR RMR-Lidar

von
Julia Amthor

Abstract: To optimise Doppler-wind measurements with the ALOMAR RMR-lidar, the optical bench was modified. Within the scope of this thesis, two new detectors were analysed and the counting characteristics of the available and new counting electronics were compared. Additionally, it was determined to what extent the modifications affected the relative accuracy of the system. The modification of the optical bench involved replacing the photomultiplier tubes with avalanche photodiodes for two channels. The counting characteristics of the detectors before and after the modification were examined. The old and new counting electronics were operated simultaneously and the data was analysed and compared. In addition to atmosphere measurements, a recently developed testing system was utilised in order to test the complete detection system under stable conditions using a light emitting diode. The tests showed that with the detector exchange, the resulting data of the measurements is still possible to be linear and stable. The dead-time of the avalanche photodiodes is lower than stated by the manufacturer and with ~ 14 ns, it is not significantly higher than that of the photomultiplier tubes. With the modifications, the counting efficiency increased by a factor of 10. The counting characteristics of both electronics are similar. The new counting electronics produce considerably fewer spikes (counting errors) than the currently used electronics.

Postal address:
Schloss-Str. 6
18225 Kühlungsborn
Germany

IAP Kühlungsborn
Februar 2007
IAP Nr. 17/2007
ISSN 1615-8083

**Erweiterung und Optimierung
der Datenerfassung des ALOMAR RMR-Lidar**

von
Julia Amthor

**Dieser Forschungsbericht wurde als Diplomarbeit vom Studienbereich
Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität
Hamburg-Harburg angenommen.**

**Gutachter: Prof. Dr. E. Brinkmeyer (Technische Universität Hamburg-Harburg)
Prof. Dr. F.-J. Lübken (Universität Rostock)**

verteidigt am: 18. Dezember 2006

Zusammenfassung

Zur Optimierung von Doppler-Windmessungen mit dem ALOMAR RMR-Lidar wurde die optische Nachweisbank umgestaltet. Im Rahmen dieser Arbeit wurden neue Detektoren untersucht sowie die Zähleigenschaften der vorhandenen und einer neuen Zähl elektronik verglichen. Dabei wurde bestimmt, inwieweit sich die Umbauten auf die relative Messgenauigkeit des Systems auswirken. Mit dem Umbau der Nachweisbank hat ein Austausch der Photovervielfacherröhren gegen Lawinenphotodioden in zwei Kanälen stattgefunden. Das Zählverhalten der Detektoren wurde vor und nach der Umgestaltung untersucht. Die Zähl elektroniken wurden zeitlich parallel betrieben und das jeweilige Zählverhalten analysiert und verglichen. Neben Atmosphärenmessungen wurde ein neu entwickeltes Testverfahren verwendet, mit dem es möglich ist, den gesamten Nachweiszweig unter gleichbleibenden Bedingungen mittels einer Leuchtdiode zu testen.

Die Tests haben gezeigt, dass auch nach dem Austausch der Detektoren weiterhin stabile und lineare Messungen durchgeführt werden können. Die Totzeit der Lawinenphotodioden ist niedriger als vom Hersteller angegeben und ist mit ~ 14 ns nicht wesentlich größer als die der Photovervielfacherröhren. Die Zähl effizienz ist nach dem Umbau um das 10-fache gestiegen. Die Zähl elektroniken zeigen ein ähnliches Zählverhalten. Die neue Elektronik ist weit weniger anfällig für Spikes (Zählfehler) als die bisherige Elektronik.

Abstract

To optimise Doppler-wind measurements with the ALOMAR RMR-lidar, the optical bench was modified. Within the scope of this thesis, two new detectors were analysed and the counting characteristics of the available and new counting electronics were compared. Additionally, it was determined to what extent the modifications affected the relative accuracy of the system. The modification of the optical bench involved replacing the photomultiplier tubes with avalanche photodiodes for two channels. The counting characteristics of the detectors before and after the modification were examined. The old and new counting electronics were operated simultaneously and the data was analysed and compared. In addition to atmosphere measurements, a recently developed testing system was utilised in order to test the complete detection system under stable conditions using a light emitting diode. The tests showed that with the detector exchange, the resulting data of the measurements is still possible to be linear and stable. The dead-time of the avalanche photodiodes is lower than stated by the manufacturer and with ~ 14 ns, it is not significantly higher than that of the photomultiplier tubes. With the modifications, the counting efficiency increased by a factor of 10. The counting characteristics of both electronics are similar. The new counting electronics produce considerably fewer spikes (counting errors) than the currently used electronics.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
2	Grundlagen	10
2.1	Lidar-Prinzip	10
2.2	Streuung des Lichts	11
2.2.1	Molekülstreuung	12
2.2.2	Aerosolstreuung	12
2.2.3	Dopplerverschiebung und -verbreiterung	13
2.3	Lidargleichung	14
2.4	Kantentechnik	16
2.5	Detektoren	19
2.5.1	Photovervielfacherröhre	19
2.5.2	Lawinenphotodiode	22
3	ALOMAR RMR-Lidar	25
3.1	ALOMAR	25
3.2	Anforderungen an das RMR-Lidar	26
3.3	Sendezweig	28
3.4	Transferzweig	29
3.5	Nachweiszweig	31
3.5.1	Optische Bank	31
3.5.2	Detektoren und die Zählelektronik	34
3.5.3	Doppler-Rayleigh-Jodspektrometer (DoRIS)	34
3.6	Simulierte Atmosphärenmessungen	36
4	Spezielle Systemanforderungen für Windmessungen	38
4.1	Spikes	38
4.2	Windmessungen	39
5	Versuchsdurchführung und Ergebnisse	41
5.1	Austausch der Detektoren und Umgestaltung der optischen Bank	41
5.1.1	Spikes	45
5.1.2	Zähleffizienz	47
5.1.3	Totzeitkorrektur und Linearität	48
5.1.4	Stabilität	53

5.2	Vergleich der Zählerlektroniken	60
5.2.1	Spikes	60
5.2.2	Zähleffizienz	62
5.2.3	Linearität	64
5.2.4	Stabilität	66
5.3	Sonstige Beobachtungen	69
5.4	Schlussfolgerung	70
6	Zusammenfassung und Ausblick	71
6.1	Zusammenfassung	71
6.2	Ausblick	71
A	LED-Testmessungen	73
B	Pulsform im DH-Kanal mit Lawinenphotodioden	74
C	Spikestabelle	75
D	Fehlerabschätzung bei Zählexperimenten	78
E	Ergebnisse	79
E.1	Austausch der Detektoren und Umgestaltung der optischenBank .	79
E.1.1	Zeitliche Entwicklung der Zählrate für das LED-Licht . . .	79
E.1.2	Zeitliche Entwicklung des Zählratenverhältnisses für das LED-Licht	80
E.2	Vergleich der Zählerlektroniken	83
E.2.1	Konfiguration der optischen Bank für 37-stündige Messung	83
E.2.2	Zeitliche Entwicklung der Zählrate für das Seederlicht und den DL-Kanal	84
E.2.3	Zeitliche Entwicklung der Zählrate für das LED-Licht . . .	85
	Literaturverzeichnis	87
	Abbildungsverzeichnis	90
	Tabellenverzeichnis	91

1 Einleitung

Die Erdatmosphäre ist eine gasförmige Hülle oberhalb der Erdoberfläche. Sie wird nach ihrem Temperaturverlauf in mehrere Schichten (Sphären) eingeteilt, deren Obergrenzen als Pausen (Temperaturminima und -maxima) bezeichnet werden. Außer den Temperaturen variieren auch die mittleren zonalen Windgeschwindigkeiten in den einzelnen Atmosphärenschichten. Dies ist in Abbildung 1.1 zu sehen. Hierbei ist der Zonalwind der Wind in Ost-West-Richtung, wobei der Wind nach Osten positiv und nach Westen negativ definiert ist. Die verschiedenen Schichten der Atmosphäre sind ebenfalls in die Abbildung eingezeichnet. Die mittlere Atmosphäre umfasst die zwischen 10 km und 110 km Höhe gelegene Stratosphäre, Mesosphäre und Mesopausenregion.

Die mittlere Atmosphäre ist weniger erforscht als die untere Atmosphäre, in der maßgeblich das Wettergeschehen auf der Erde bestimmt wird. Dies liegt insbesondere an der schwierigen Zugänglichkeit dieses Atmosphärenbereiches. Dennoch besteht großes wissenschaftliches Interesse an dessen Erforschung. Neben dem Auftreten verschiedener interessanter Phänomene wie polarer Stratosphärenwolken und leuchtender Nachtwolken spielt auch der Wind in der mittleren Atmosphäre eine wichtige Rolle.

Der Wind ist eine dynamische Größe und hat Einfluss auf viele stratosphärische Prozesse. Ein Beispiel dafür sind die Stratosphärenenerwärmungen. Bei einer

Stratosphärenenerwärmung heizt sich die obere Stratosphäre im Winter im Laufe weniger Tage um bis zu 80 Kelvin auf. Ursache hierfür ist die adiabatische Erwärmung durch Absinken der Luft, verursacht durch eine Veränderung der atmosphärischen Zirkulation, also der Winde, in der mittleren Atmosphäre. Die Ausbreitung von Wellen wird ebenfalls durch den Wind beeinflusst. Wellen führen

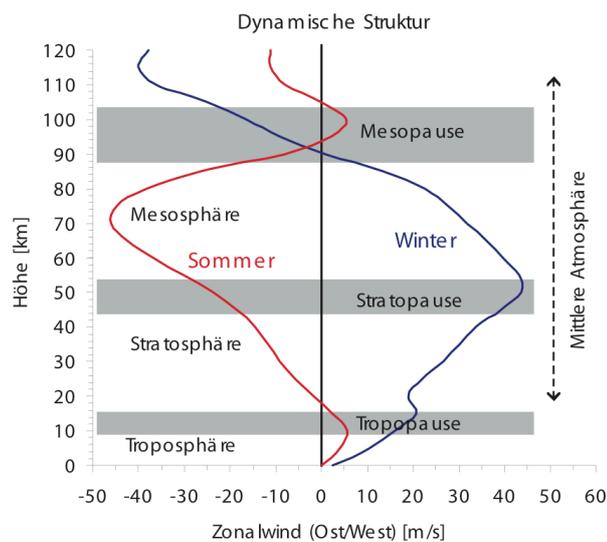


Abbildung 1.1: Zonalwind aus der CIRA86 Referenzatmosphäre [Fleming et al., 1990] für 70°N.

zu Schwankungen des Drucks, der Temperatur, der Dichte und somit auch der Winde in der Atmosphäre. Sie sind ein wichtiger Antrieb für die atmosphärische Zirkulation und umfassen alle Skalen von Rossby-Wellen ($\lambda_{horiz} \approx 10000$ km) über Schwerewellen ($\lambda_{horiz} = 10 - 1000$ km) bis hin zur Turbulenz. Alle diese Wellen transportieren Energie vom Ort ihrer Anregung zum Ort ihrer Brechung, wo sie ihre Energie und ihren Impuls auf die Hintergrundatmosphäre übertragen. Dies geschieht meistens von den unteren Schichten nach oben. Wellen sind auch der Grund, weshalb die Sommermesopause kälter ist als die Wintermesopause. Die Ausbreitung dieser Wellen wird ganz maßgeblich durch den mit der Höhe sich ändernden Wind beeinflusst. Er führt sowohl zur Änderung der Wellenparameter (Amplitude, vertikale und horizontale Wellenlängen) als auch zur so genannten Filterung von Wellen, die sich dann nicht weiter nach oben ausbreiten können.

Windmessungen stellen in der mittleren Atmosphäre eine technische Herausforderung dar. Radargeräte decken durch kontinuierliche Messungen den Höhenbereich bis etwa 20 km und zwischen 60 km und 100 km ab. Allerdings besteht im Bereich zwischen 20 km und 60 km die so genannte Radarlücke, in der aus physikalischen Gründen keine Radarmessungen möglich sind. Forschungsraketen sind eine Möglichkeit, in-situ Windmessungen in diesem Höhenbereich durchzuführen. Allerdings ist dies sehr teuer und bietet zudem nur stichprobenartige Messungen. Kostengünstigere Forschungsballons, die ebenfalls nur die Möglichkeit von Stichproben geben, erreichen lediglich Höhen bis 35 km. Mit einem Lidar¹, einem aktiven optischen Fernerkundungssystem, wird die Möglichkeit geboten, diesen Höhenbereich mittel- und langfristig durch kontinuierliche Messungen zu untersuchen. Allerdings ist die Windmessung zwischen 20 km und 60 km ebenfalls nicht mit allen Lidartechniken möglich. Mit einem Rayleigh-Lidar aber kann der Höhenbereich von 10 km bis 95 km untersucht werden. Ist dieses Lidar zusätzlich als Dopplerlidar modifiziert, sind Windmessungen im Höhenbereich zwischen 10 km und 70 km möglich. Das Dopplerlidar basiert auf der optischen Dopplerverschiebung des emittierten Lichts an sich bewegenden Atomen und Molekülen. Diese Dopplerverschiebungen lassen sich in Windgeschwindigkeiten umrechnen. Das RMR²-Lidar auf der in Nordnorwegen gelegenen Forschungsstation ALOMAR³ ist u.a. zu diesem Zweck entwickelt worden. Anhand der dopplerverschobenen Rückstreuungssignale sollen Informationen über den Wind in der arktischen mittleren Atmosphäre erhalten werden. Um beide horizontalen Komponenten des Windes bestimmen zu können, verfügt das Lidar über zwei identische leistungsstarke Laser sowie über zwei schwenkbare Teleskope. Prinzipiell muss zur Windmessung mit einem Dopplerlidar die Windgeschwindigkeit (≤ 50 m/s) mit der um sechs Größenordnungen größeren Lichtgeschwindigkeit verglichen werden. Bei der emittierten Wellenlänge des RMR-Lidar von 532 nm entspricht eine Windgeschwindigkeit von 1 m/s dabei einer Dopplerverschiebung

¹Lidar: **L**ight **D**etection and **R**anging

²RMR: **R**ayleigh **M**ie **R**aman



Abbildung 1.2: Das ALOMAR Observatorium im Oktober 2005. Es befindet sich auf der nordnorwegischen Insel Andøya [Foto: privat].

von 3,5 fm. Um diese nachweisen zu können, werden sehr hohe Anforderungen an die Technik gestellt. Zum Einen muss das emittierte Licht äußerst stabil in der Wellenlänge sein, und zum Anderen müssen die Nachweisoptik und -elektronik sehr genau arbeiten, um diese geringen Wellenlängenänderungen mit hoher Genauigkeit nachweisen zu können. Einige Bedingungen hierfür werden im Rahmen dieser Arbeit untersucht. So sollen die für Windmessungen benötigten Detektoren ausgetauscht werden. Die Photovervielfacherröhren sollen dabei durch Lawinenphotodioden ersetzt werden, von denen sich eine höhere Zähleffizienz erhofft wird. Um Informationen über die Zähleigenschaften der neuen Detektoren zu erhalten, sollen sie im Vergleich zu den alten Detektoren auf ihre Zähleffizienz, Linearität und Stabilität hin untersucht werden. Da die vorhandene Zählelektronik nach 12 Jahren Einsatz einige Mängel aufweist, soll eine neue Zählelektronik gekauft werden. Um zu testen, ob die neue Elektronik den Anforderungen für Windmessungen entspricht, ist eine im Vergleich zur alten Elektronik stattfindende Untersuchung der Zähleigenschaft, der Linearität und der Stabilität notwendig.

Im Kapitel 2 wird ein kurzer Überblick über das Prinzip der Lidartechnik sowie eine Erklärung der für Windmessungen genutzten Kantentechnik gegeben. In Kapitel 3 folgt eine Beschreibung der ALOMAR Forschungsstation und des dort befindlichen RMR-Lidar. Dabei wird näher auf die Anforderungen an dieses Lidar eingegangen und eine Beschreibung der wichtigsten Komponenten dieses komplexen Lidar gegeben. Zusätzlich werden die für diese Arbeit relevanten Komponenten näher erklärt. Kapitel 4 beschreibt die speziellen Anforderungen an das Lidar für Windmessungen. In Kapitel 5 werden die Versuchsdurchführung erläutert und die gewonnenen Ergebnisse dargestellt und diskutiert. In Kapitel 6 wird schließlich eine Zusammenfassung und ein Ausblick gegeben.

2 Grundlagen

2.1 Lidar-Prinzip

Ein Lidar, das als Abkürzung für **L**ight **D**etection and **R**anging steht, ist ein aktives optisches Fernerkundungssystem, das unter anderem zur Erforschung der Erdatmosphäre eingesetzt wird. Das Funktionsprinzip ist ähnlich dem eines Radars¹. Während beim Radar Radiowellenstrahlung benutzt wird, werden beim Lidar Lichtwellen eines gepulsten Lasers² in die Atmosphäre abgestrahlt. Das Licht wird an Luftmolekülen und Aerosolen in alle Richtungen gestreut. Das unter einem Streuwinkel von 180° rückgestreute Licht wird mit Hilfe eines Teleskops gesammelt und durch Filter spektral analysiert. Die optischen Signale werden schließlich von Photodetektoren in elektrische Pulse umgewandelt, gezählt und elektronisch weiterverarbeitet.

Aus der Laufzeit des Lichtes bis zum Streukörper und zurück zum Detektor lässt sich die Höhe z des Streukörpers bestimmen. Hierbei ist c die Lichtgeschwindigkeit in Luft und τ die Laufzeit des Lichtes zum Streukörper und zurück. Der Faktor $\frac{1}{2}$ berücksichtigt, dass das Licht die Strecke zweimal durchläuft, bevor es detektiert werden kann.

$$z = \frac{c \cdot \tau}{2} \quad (2.1)$$

In der Empfangselektronik werden die empfangenen Pulse für eine bestimmte Zeitspanne, also einen Höhenbereich (Höhenbin), gezählt und gespeichert. Ist diese Zeitspanne $\Delta\tau$ größer als der Laserpuls, wird durch sie das räumliche Auflösungsvermögen in Blickrichtung des Lidar begrenzt. Die Länge Δz eines Höhenbins beträgt

$$\Delta z = \frac{c \cdot \Delta\tau}{2}. \quad (2.2)$$

Aus den rückgestreuten Signalen lassen sich Aussagen über die Zusammensetzung bestimmter Atmosphärenschichten, ihre Temperaturen und Dichte sowie Winde treffen. Arbeitet das Lidar mit mehreren Wellenlängen, so können zusätzlich Aussagen über die Größenverteilung von Aerosolen getroffen werden.

¹Radar: **R**adio **D**etection and **R**anging

²Laser: **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation

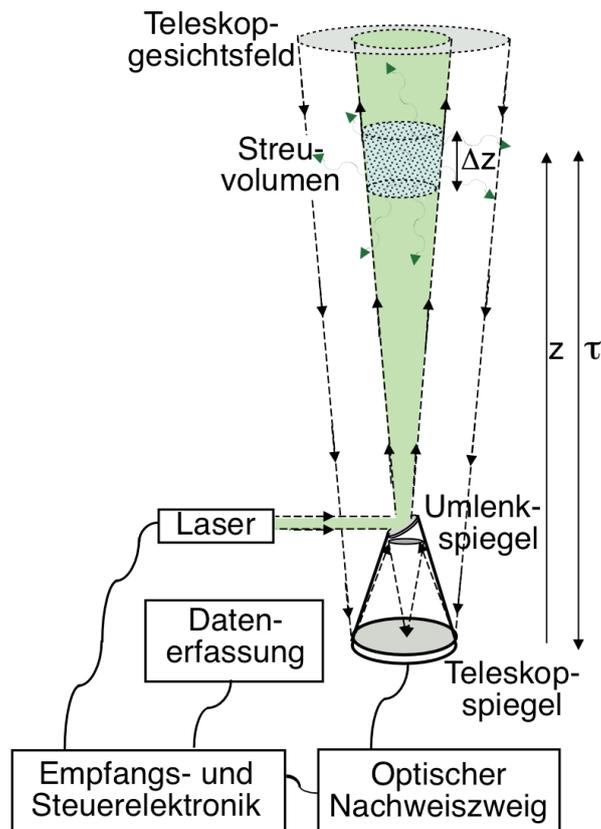


Abbildung 2.1: Prinzip des Lidar. Laserlicht wird über einen Umlenkspiegel in die Atmosphäre gelenkt. Die rückgestreuten Photonen werden durch den Teleskopspiegel gesammelt, im optischen Nachweisweig analysiert und in elektrische Pulse umgewandelt, die durch die Empfangselektronik gezählt werden.

2.2 Streuung des Lichts

Die Wechselwirkung zwischen Licht und Materie kann als Stoßprozess angesehen werden, wobei der Streuquerschnitt σ die Stärke der Streuung angibt. Der Begriff Streuquerschnitt stammt aus der klassischen Stoßtheorie von harten Kugeln. Dort entspricht der Streuquerschnitt dem Querschnitt der Kugel. Es wird zwischen elastischer und inelastischer Streuung unterschieden. Während bei der elastischen Streuung die Summe der kinetischen Energien vor und nach dem Stoß erhalten bleibt, findet bei der inelastischen Streuung eine Änderung der kinetischen Energie statt. Dies führt bei der Lichtstreuung zu einer Veränderung der Wellenlänge des gestreuten Lichts relativ zum ausgesandten Licht. Die für Lidarmessungen wesentlichen Streumechanismen des Lichtes werden im Folgenden erläutert.

2.2.1 Molekülstreuung

Als Molekül- oder Atomstreuung wird die Streuung von Licht an Partikeln, deren Durchmesser wesentlich kleiner als die Wellenlänge des Lichtes ist, bezeichnet. In der Atmosphäre findet Molekülstreuung hauptsächlich an Sauerstoff- und Stickstoffmolekülen statt. Innerhalb der Molekülstreuung kann zwischen mehreren Mechanismen unterschieden werden.

- **Cabannesstreuung**

Die Cabannesstreuung ist ein elastischer Streuprozess. Die Wellenlänge des Streulichtes ist gegenüber der Wellenlänge des eingestrahnten Lichtes bis auf eine eventuelle Dopplerverschiebung unverändert. Die Spektrallinie wird Cabannes-Linie genannt [*Cabannes, 1929*].

- **Ramanstreuung**

Die Ramanstreuung ist ein inelastischer Streuprozess. Es findet ein Energieaustausch zwischen dem Streumolekül und dem Lichtteilchen statt. Durch Veränderung seiner Rotations- oder Vibrationsquantenzahl gibt das Molekül entweder Energie an das Photon ab oder nimmt Energie von ihm auf. Je nachdem ob der Energieaustausch über eine Veränderung der Rotations- oder Vibrationsquantenzahl stattfindet, wird von Rotations- oder Vibrationsramanstreuung gesprochen. Da der Energieaustausch ein quantenmechanischer Prozess ist, ist die Energieänderung des Moleküls und damit des Lichtes molekülspezifisch [*Raman und Krishnan, 1928*].

- **Rayleighstreuung**

Als Rayleighstreuung wird nach *Young* [1981] zusammenfassend die Cabannesstreuung und die Rotationsramanstreuung bezeichnet. Der Streuquerschnitt σ der Rayleighstreuung ist umgekehrt proportional zur vierten Potenz der Wellenlänge λ :

$$\sigma \sim \frac{1}{\lambda^4}. \quad (2.3)$$

2.2.2 Aerosolstreuung

Als Aerosolstreuung wird die Streuung von Licht an Partikel, die größer als 1 nm sind, bezeichnet [*Baumgarten, 2001*]. Die Aerosolstreuung ist eine elastische Streuung, d.h. es findet außer einer möglichen Dopplerverschiebung keine Veränderung der Wellenlänge statt. Die Aerosolstreuung an sphärischen Streuern wird als **Mie-Streuung** bezeichnet [*Mie, 1908*].

2.2.3 Dopplerverschiebung und -verbreiterung

Bewegt sich das Streuzentrum relativ zum Beobachter, findet aufgrund des optischen Dopplereffekts eine Wellenlängenverschiebung des Lichtes um $\Delta\lambda$ statt

$$\Delta\lambda = 2 \frac{\lambda_0}{c} v \quad (2.4)$$

λ_0 steht für die ausgesandte Wellenlänge, c für die Lichtgeschwindigkeit in Luft und v für die Geschwindigkeit des Streuzentrums relativ zum Beobachter, die als positiv angenommen wird, wenn sich das Streuzentrum vom Beobachter weg bewegt. Die Verschiebung $\Delta\lambda$ ist demnach negativ, wenn sich das Streuzentrum dem Beobachter nähert, und positiv, wenn es sich entfernt. In der Atmosphäre wird eine Bewegung der Streuzentren zum Einen durch die thermische Bewegung der Teilchen und zum Anderen durch die Dynamik der Atmosphäre (Winde) verursacht.

Die thermische Bewegung der Atmosphärenteilchen unterliegt der Maxwell-Boltzmann-Geschwindigkeitsverteilung. Durch die Dopplerverschiebung folgt für diese Geschwindigkeitsverteilung ein gaußförmiges Linienspektrum, was als Aufweitung der Spektrallinie $\delta\lambda$ angesehen werden kann (Dopplerverbreiterung). Die Halbwertsbreite $\delta\lambda_{1/2}$ ist hierfür gegeben durch

$$\delta\lambda_{1/2} = 2 \sqrt{2 \ln 2} \sigma_D = 2 \frac{\lambda_0}{c} \sqrt{\frac{8 k_B T \ln 2}{m}} \quad (2.5)$$

wobei σ_D die Standardabweichung, k_B die Boltzmann-Konstante, T die Temperatur, c die Lichtgeschwindigkeit in Luft, m die Masse des Streuers und λ_0 die emittierte Wellenlänge ist. Für die Streuung an Molekülen beträgt die Halbwertsbreite für $\lambda_0 = 532$ nm etwa $\delta\lambda_{1/2} \approx 2$ pm. Der Abstand der Rotationsramanlinie zur unverschobenen Cabanneslinie ist 0,34 nm und größer [Baumgarten, 2001]. Die dopplerverbreiterte Cabanneslinie kann somit von der Rotationsramanlinie unterschieden werden. Da die Aerosole eine im Vergleich zu den Molekülen große Masse haben, ist ihre thermische Beweglichkeit und somit ihre Geschwindigkeit recht gering. Die Dopplerverbreiterung der Spektrallinie beträgt für Aerosole mit 1 μm Durchmesser ca. 10^{-3} fm.

Werden die Aerosole oder Moleküle zusätzlich durch Winde bewegt, erfahren die Photonen eine zusätzliche Dopplerverschiebung, die sich mit der durch die thermische Eigenbewegung hervorgerufenen Dopplerverbreiterung, wie in Abbildung 2.2 dargestellt, überlagert. Eine Windgeschwindigkeit von 1 m/s verursacht bei 532 nm eine Verschiebung der Wellenlänge von etwa $\Delta\lambda \approx 3,5$ fm.

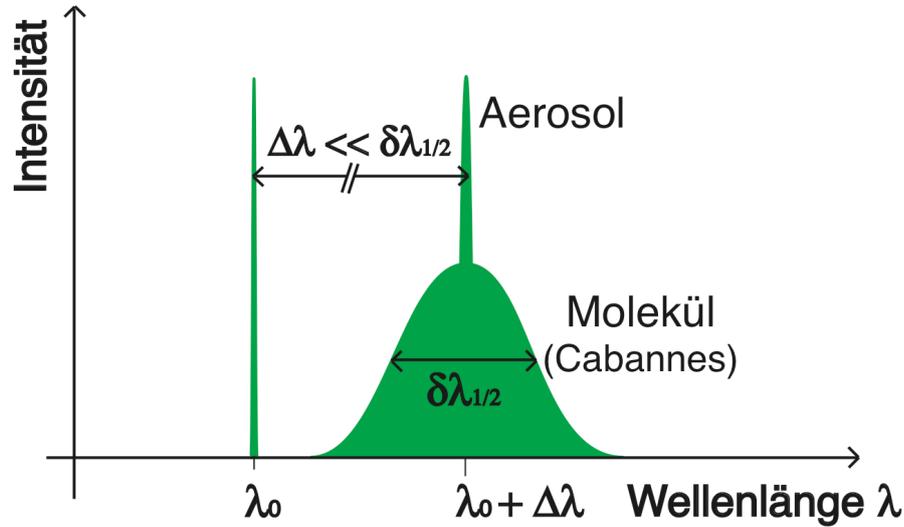


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung der Dopplerverbreiterung $\delta\lambda$ und Dopplerverschiebung $\Delta\lambda$ für Moleküle und Aerosole bei der emittierten Wellenlänge λ_0 .

2.3 Lidargleichung

Die Anzahl der Photonen, die von einem Lidarinstrument detektiert werden, lässt sich anhand der Lidargleichung unter Berücksichtigung instrumenteller und geophysikalischer Parameter beschreiben. Die Lidargleichung in einer einfachen Form ohne Berücksichtigung der Polarisation oder kleiner Wellenlängenänderungen ($\frac{\Delta\lambda}{\lambda} < 10^{-3}$) lautet:

$$P(\lambda_{\uparrow}, \lambda_{\downarrow}, z) = K(\lambda_{\uparrow}, \lambda_{\downarrow}) G(z) \beta(\lambda_{\uparrow}, \lambda_{\downarrow}, z) T_A(\lambda_{\uparrow}, \lambda_{\downarrow}, z) + \text{Untergrund} \quad (2.6)$$

$P(\lambda_{\uparrow}, \lambda_{\downarrow}, z)$ ist Anzahl der detektierten Photonen. Sie ist abhängig von der vom Laser emittierten Wellenlänge λ_{\uparrow} , der Wellenlänge der rückgestreuten Photonen λ_{\downarrow} und der Strecke z vom Lidarinstrument zum betrachteten Streukörper.

Die ersten beiden Faktoren der rechten Seite der Gleichung $K(\lambda_{\uparrow}, \lambda_{\downarrow})$ und $G(z)$ beschreiben die Systemeigenschaften des Lidarinstruments.

$K(\lambda_{\uparrow}, \lambda_{\downarrow})$ ist eine Systemkonstante, die sich aus der Anzahl der ausgesandten Photonen $P_0(\lambda_{\uparrow})$, dem betrachteten Höhenbereich $\Delta z = \frac{c\Delta\tau}{2}$, der Fläche der Primärempfangsoptik A und dem Wirkungsgrad des Empfängersystems $\eta(\lambda_{\downarrow})$ zusammensetzt.

$$K(\lambda_{\uparrow}, \lambda_{\downarrow}) = P_0(\lambda_{\uparrow}) \frac{c\Delta\tau}{2} A \eta(\lambda_{\downarrow}) \quad (2.7)$$

$G(z)$ ist eine entfernungsabhängige Messgeometrie, in die der Überlappungseffekt von Laserstrahl und Teleskopgesichtsfeld $O(z)$ sowie die Entfernung z des Streuzentrums zum Instrument eingehen. Überlappen sich das Teleskopgesichtsfeld und die Laserkeule komplett, gilt $O(z) = 1$. Die Abschwächung des Signals um z^2 resultiert daher, dass der Raumwinkel, den die Teleskopfläche für den Streukörper einnimmt, mit wachsendem Abstand geringer wird. Zusammen mit der exponentiell abnehmenden Dichte der Atmosphäre hat dies eine hohe Dynamik des Lidarsignals über die Höhe zur Folge.

$$G(z) = \frac{O(z)}{z^2} \quad (2.8)$$

Der dritte und vierte Term $\beta(\lambda_{\uparrow}, \lambda_{\downarrow}, z)$ und $T_A(\lambda_{\uparrow}, \lambda_{\downarrow}, z)$ sind Parameter, die ausschließlich durch die Eigenschaften der Atmosphäre beschrieben werden.

$\beta(\lambda_{\uparrow}, \lambda_{\downarrow}, z)$ ist der Rückstreuoeffizient. Er setzt sich additiv aus den Rückstreuoeffizienten der einzelnen Streumechanismen zusammen. Durch den Rückstreuoeffizienten wird angegeben, wie viele Photonen um 180° zurückgestreut werden. Er ist das Produkt aus dem differentiellen Streuquerschnitt in Rückwärtsrichtung $\left. \frac{d\sigma}{d\Omega} \right|_{180^\circ}(\lambda_{\uparrow}, \lambda_{\downarrow})$ und der Anzahldichte der Atmosphäre $n(z)$ für den jeweiligen Streumechanismus.

$$\begin{aligned} \lambda_{\uparrow} = \lambda_{\downarrow} : \\ \beta(\lambda_{\uparrow}, z) &= \beta_{Cab}(\lambda_{\uparrow}, z) + \beta_{Mie}(\lambda_{\uparrow}, z) \\ &= \left. \frac{d\sigma_{Cab}}{d\Omega} \right|_{180^\circ}(\lambda_{\uparrow}) n_{Mol}(z) + \left. \frac{d\sigma_{Mie}}{d\Omega} \right|_{180^\circ}(\lambda_{\uparrow}) n_{Aer}(z) \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} \lambda_{\uparrow} \neq \lambda_{\downarrow} : \\ \beta(\lambda_{\uparrow}, \lambda_{\downarrow}, z) &= \beta_{Ram}(\lambda_{\uparrow}, \lambda_{\downarrow}, z) \\ &= \left. \frac{d\sigma_{Ram}}{d\Omega} \right|_{180^\circ}(\lambda_{\uparrow}, \lambda_{\downarrow}) n_{Mol}(z) \end{aligned} \quad (2.10)$$

$T_A(\lambda_{\uparrow}, \lambda_{\downarrow}, z)$ beschreibt die Transmission, d.h. die Durchlässigkeit der Atmosphäre für Licht, die dem Lambert-Beer-Gesetz folgt:

$$T_A(\lambda, z) = e^{-\int_0^z \alpha(\lambda, z) dz} \quad (2.11)$$

$\alpha(\lambda, z)$ ist dabei der Extinktionskoeffizient, der die Abschwächung des Lichtes in einem Medium beschreibt. Extinktion wird durch die Streuung und Absorption von Licht an Partikeln und Molekülen verursacht. Der Extinktionskoeffizient ist abhängig von der Wellenlänge des Lichtes und setzt sich ähnlich wie der Rückstreuoeffizient aus der Summe der einzelnen Extinktionsmechanismen zusammen.

Für den Transmissionsterm muss sowohl der Lichtweg und somit die Transmission zum Streuzentrum und vom Streuzentrum zurück zum Empfänger berücksichtigt werde:

$$T_A(\lambda_{\uparrow}, \lambda_{\downarrow}, z) = T_A(\lambda_{\uparrow}, z) \cdot T_A(\lambda_{\downarrow}, z) \quad (2.12)$$

Untergrund Der Untergrund setzt sich aus unerwünschten Photonen, die zwar detektiert werden, jedoch nicht aus dem Laserpuls stammen, und dem Rauschen der Nachweiselektronik zusammen. Untergrundlicht kann durch jegliche Lichtquelle, wie z.B. die Sonne, den Mond, Polarlichter oder Lampen erzeugt werden.

Eine ähnliche Beschreibung der Lidargleichung ist in *Weitkamp* [2005] zu finden.

2.4 Kantentechnik

Eine effektive Methode zur Bestimmung der Windgeschwindigkeit über die Dopplerverschiebung ist die Kantentechnik. Die Kantentechnik ist ein inkohärentes Verfahren, das es ermöglicht, kleinste Wellenlängenverschiebungen zu detektieren und zu messen [*Korb et al.*, 1992]. Sie wird durch zwei entscheidende Merkmale charakterisiert:

1. Die Laserwellenlänge wird etwa in die Mitte der Kante eines hochauflösenden Filters gesetzt. Eine kleine Änderung in der Frequenz bewirkt damit eine starke Änderung der Transmission durch den Filter und somit eine starke Änderung in der Signalintensität.
2. Durch eine differentielle Messung zwischen rückgestreutem Signal und dem durch den Laser emittierten Signal wird die Messung stabil gegenüber Laserschwankungen oder Schwankungen der Detektoren gemacht.

Für die Kantentechnik werden hochauflösende optische Filter mit einem schmalbandigen Filterspektrum $F(\lambda)$ benötigt. Hierzu werden u.a. molekulare und atomare Absorptionslinien wie z.B. im Jodmolekularfilter benutzt. Für Licht mit der spektralen normierten Energieverteilung $H(\lambda)$ ist das Transmissionsspektrum $T_F(\lambda)$ am Ausgang des Filters für die Wellenlänge λ gegeben durch die Faltung:

$$T_F(\lambda) = \int_{-\infty}^{\infty} H(\lambda - \lambda') F(\lambda') d\lambda' = H(\lambda) * F(\lambda) \quad (2.13)$$

Um die Dopplerverschiebung zu bestimmen, werden zwei Detektoren zur Messung der Lichtintensität benötigt (siehe Abbildung 2.3). Detektor 1 wird als Referenzdetektor vor dem Filter benötigt. Mit Detektor 2 wird die Intensität des Lichtes gemessen, das den Filter passiert hat. Durch einen Strahlteiler wird das Licht vor

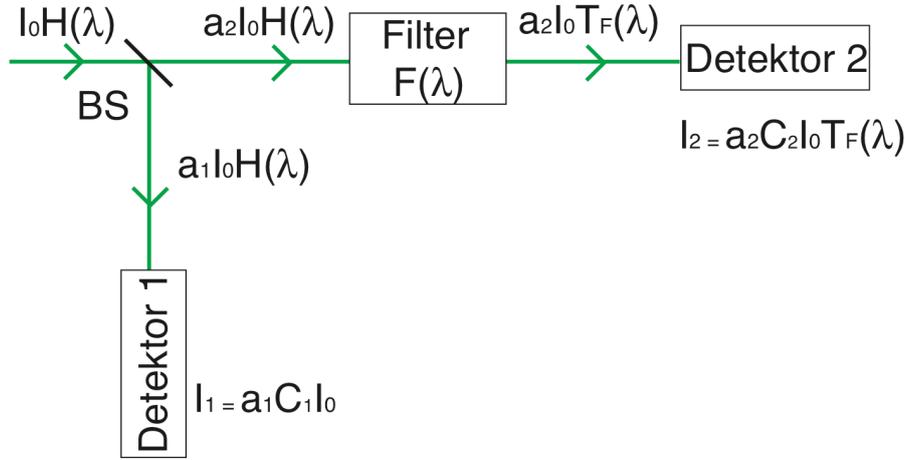


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung der Kantentechnik. Das Signal wird über einen Strahlteiler (BS) auf die beiden Detektoren aufgeteilt. Im Strahlengang vor Detektor 2 befindet sich ein Molekularfilter mit dessen Filterfunktion das Signal gefaltet wird.

dem Filter im Verhältnis $a_1 : a_2$ aufgeteilt. Das von Detektor 1 gemessene Signal I_1 beträgt

$$I_1 = a_1 C_1 I_0 \int_{-\infty}^{\infty} H(\lambda) d\lambda = a_1 C_1 I_0. \quad (2.14)$$

I_0 ist die Intensität des einfallenden Lichtes und C_1 die Systemkonstanten von Detektor 1, in die u.a. dessen Signalverstärkung und Quanteneffizienz eingehen. Das mit dem Filterspektrum gefaltete Signal wird von Detektor 2 gemessen als

$$I_2(\lambda) = a_2 C_2 I_0 \int_{-\infty}^{\infty} H(\lambda - \lambda') F(\lambda') d\lambda' = a_2 C_2 I_0 T_F(\lambda). \quad (2.15)$$

wobei C_2 die Systemkonstante dieses Detektors ist. Das Signalverhältnis $I_N(\lambda)$ von Detektor 2 zu Detektor 1 ist somit unabhängig von der Transmission der Atmosphäre und der emittierten Lichtmenge:

$$I_N(\lambda) = \frac{I_2(\lambda)}{I_1} = \frac{a_2}{a_1} \cdot \frac{C_2}{C_1} T_F(\lambda) = C T_F(\lambda) \quad (2.16)$$

Die Konstante

$$C = \frac{a_2 C_2}{a_1 C_1} \quad (2.17)$$

wird aus Referenzmessungen mit einem bekannten Signal bestimmt, das anstelle des rückgestreuten Lichtes in den Aufbau eingekoppelt wird. Aufgrund der Dopp- lerverbreiterung $\delta\lambda$ besitzt das aus der Atmosphäre rückgestreute Licht jedoch

eine andere Energieverteilung als das emittierte Laserlicht mit der Wellenlänge λ_0 , woraus unterschiedliche Filtertransmissionen für das rückgestreute Licht und das Laserlicht resultieren. Im Folgenden wird das Filtertransmissionsspektrum des Laserlichts mit $T_{FL}(\lambda_0)$ und das des aus der Atmosphäre rückgestreuten Lichts, bei dem die Dopplerverschiebung $\Delta\lambda$ und die Dopplerverbreiterung $\delta\lambda$ berücksichtigt werden, mit $T_{FA}(\lambda_0, \Delta\lambda, \delta\lambda)$ bezeichnet. Das Signalverhältnis der beiden Detektoren für das Laserlicht wird durch

$$I_{NL}(\lambda_0) = C T_{FL}(\lambda_0) \quad (2.18)$$

gegeben. Hieraus kann bei bekanntem Transmissionsspektrum $T_{FL}(\lambda_0)$ die Konstante C ermittelt werden kann. Für das aus der Atmosphäre rückgestreute dopplerverschobene und dopplerverbreiterte Licht beträgt das Signalverhältnis

$$I_{NA}(\lambda_0, \Delta\lambda) = C T_{FA}(\lambda_0, \Delta\lambda, \delta\lambda) \quad (2.19)$$

Um die Dopplerverschiebung aus diesen Messungen bestimmen zu können, muss die Transmissionsfunktion $T_{FA}(\lambda_0, \Delta\lambda, \delta\lambda)$ bekannt sein. Zur Berechnung dieser Transmissionsfunktion für unterschiedliche Dopplerverschiebungen $\Delta\lambda$ und Dopplerverbreiterungen $\delta\lambda$ wird zunächst die Transmissionsfunktion T_{FL} für das monochromatische Licht vermessen. Anschließend kann die Transmissionsfunktion $T_{FA}(\lambda_0, \Delta\lambda, \delta\lambda)$ für verschiedene Kombinationen von $\Delta\lambda$ und $\delta\lambda$ durch Faltung des Rückstreuungsspektrums mit $T_{FL}(\lambda)$ berechnet werden. Zur Bestimmung der Dopplerverschiebung aus dem gemessenen Signalverhältnis $I_N(\lambda_0, \Delta\lambda, \delta\lambda)$ muss die Dopplerverbreiterung bekannt sein. Diese kann bei bekannter Temperatur und Aerosolbetrachtung der Atmosphäre berechnet werden.

2.5 Detektoren

Das rückgestreute Licht wird durch Photodetektoren in ein elektrisches Signal umgewandelt. Hierzu werden bei besonders sensitiven Lidar-Instrumenten im Photonenzählmodus arbeitende Photovervielfacherröhren und Lawinenphotodioden benutzt, die im Folgenden näher beschrieben werden.

2.5.1 Photovervielfacherröhre

Die Photovervielfacherröhre (*englisch*: Photomultiplier Tube (PMT)) ist eine Elektronenröhre, mit der es möglich ist, einzelne Photonen zu detektieren. Eine Photovervielfacherröhre besteht prinzipiell aus einer Vakuumröhre mit Eingangsfenster, einer Photokathode, fokussierenden Elektroden, Dynoden und einer Anode. Das Funktionsprinzip ist in Abbildung 2.4 gezeigt.

Die einfallenden Photonen treffen durch ein für ihre Wellenlänge transparentes Eingangsfenster in die Vakuumröhre hinein und treffen dort auf die Photokathode. Die Photokathode besteht aus einem Metall, dessen Oberfläche eine niedrige Austrittsarbeit besitzt, so dass durch das Auftreffen der Photonen Elektronen aus der Metalloberfläche freigesetzt werden (äußerer photoelektrischer Effekt für dessen Entdeckung Albert Einstein 1921 den Nobelpreis erhielt [*Einstein*, 1905]). Die freigesetzten Photoelektronen werden durch ein fokussierendes elektromagnetisches Feld auf die erste Dynode gelenkt. Bei ihrem Aufprall schlagen die Photoelektronen Sekundärelektronen aus der Dynodenoberfläche. Die Sekundärelektronen treffen auf die nächste Dynode und schlagen ebenfalls weitere Sekundärelektronen aus der Oberfläche heraus. Die Anzahl der Elektronen vermehrt sich kaska-

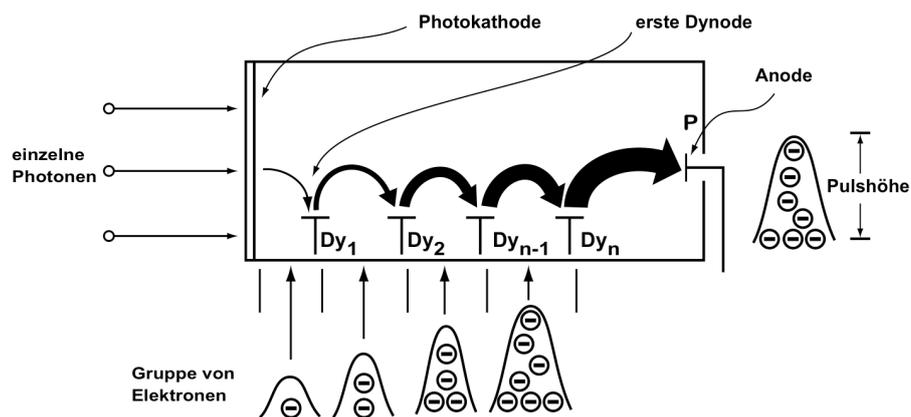


Abbildung 2.4: Prinzip einer im Photonenzählmodus arbeitenden Photovervielfacherröhre nach *Hamamatsu Photonics K.K.* [2006]. Durch ein eintreffendes Photon wird ein Elektron aus der Photokathode herausgelöst. Von Dynode zu Dynode vervielfacht sich die Anzahl der Elektronen kaskadenartig.

denartig von Dynode zu Dynode. Am Ende treffen die Elektronen auf die Anode, wo sie in Form eines Strompulses gemessen werden können.

Ein Photovervielfacher wird durch folgende Kenngrößen charakterisiert:

- Die Quanteneffizienz (QE) gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass ein einfallendes Photon ein Elektron aus der Photokathode herauslöst. Sie liegt zwischen 0 oder 1.
- Der Sammlungsgrad (CE - *englisch*: collection efficiency) ist die Wahrscheinlichkeit für das Auftreffen der Photoelektronen auf der ersten Dynode.
- Die Detektionsausbeute (DE - *englisch*: detection efficiency) ist das Verhältnis der Anzahl der einfallenden Photonen zu der Anzahl der Ausgangspulse.

$$DE = \frac{\text{Anzahl einfallender Photonen}}{\text{Anzahl der Ausgangspulse}} = QE \cdot CE \quad (2.20)$$

Die Pulshöhe und -breite des Ausgangspulses ist nicht für jedes auftreffende Photon gleich. Die Anzahl der pro auftreffendes Elektron aus einer Dynode herausgeschlagenen Sekundärelektronen variiert und kann als Poissonverteilung mit einer durchschnittlichen Anzahl emittierter Sekundärelektronen δ angenommen werden. Bei n Dynoden wird ein einzelnes aus der Photokathode herausgelöstes Elektron um den Faktor δ^n multipliziert. Die Höhe und Breite des Ausgangspulses variiert folglich.

Bei der Photovervielfacherröhre kann zwischen zwei Betriebsarten unterschieden werden:

- **Strommodus (analoge Betriebsart)**

Bei hohen Lichtintensitäten ist die Anzahl der einfallenden Photonen so hoch, dass sich die Pulse der einzelnen Photonen überlappen. Es können dann nicht die einzelnen Pulse sondern nur der daraus resultierende analoge Strom gemessen werden. Dieser Strom setzt sich aus dem Gleichstromanteil der gemittelten Pulse sowie deren Fluktuation (die AC-Komponente), die durch die verschiedenen Pulshöhen und Pulsbreiten entsteht, zusammen (Abb 2.5).

- **Photonenzählmodus (digitale Betriebsart)**

Bei geringer Lichtintensität, wenn die Pulse der einfallenden Photonen zeitlich weit genug auseinander liegen, ist es möglich, jeden einzelnen diskreten Puls an der Anode zu detektieren. Diese digitale Zählweise wird auch als "Photon Counting" (Photonenzählen) bezeichnet (siehe Abbildung 2.6). Die Anzahl der Ausgangspulse ist hierbei direkt proportional zu der Anzahl der einfallenden Photonen. Es muss jedoch die Totzeit τ_d des Detektors

berücksichtigt werden. Treffen zwei Photonen zeitlich zu kurz hintereinander auf die Photokathode, überlappen sich ihre Ausgangspulse und können nicht von einander getrennt werden. Dies wird in der Auswertung in Abschnitt 5.8 diskutiert.

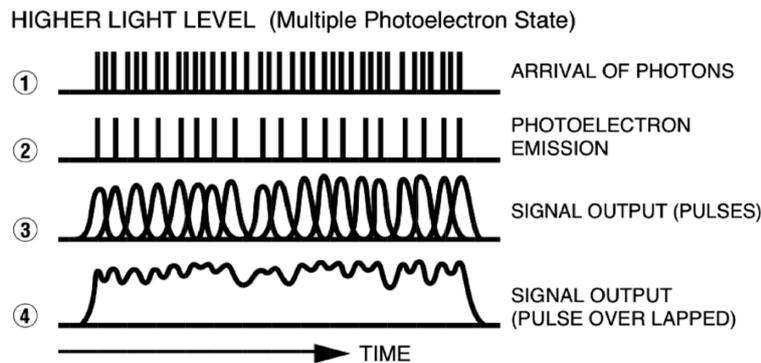


Abbildung 2.5: Die Pulse am Ausgang der Photovervielfacherröhre bei hohen Lichtintensitäten [Hamamatsu Photonics K.K., 2001].

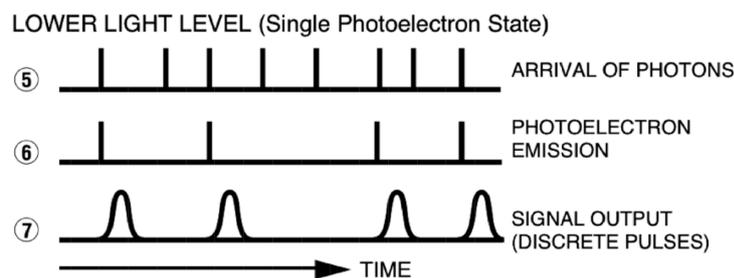


Abbildung 2.6: Pulse am Ausgang der Photovervielfacherröhre bei niedrigen Lichtintensitäten [Hamamatsu Photonics K.K., 2001].

Das digitale Photonen zählen weist im Vergleich zur analogen Betriebsart, bei der alle Pulse gemittelt werden, ein besseres Signal-zu-Rausch Verhältnis auf. Aber auch hier entstehen Pulse, die nicht durch die einfallenden Photonen entstanden sind, sondern ihren Ursprung im Dunkelstrom, der kosmischen Strahlung oder der thermischen Elektronenemission haben. Da die Photokathode aus einem Metall mit geringer Austrittsarbeit besteht, können schon bei Raumtemperatur Elektronen emittieren, ohne dass zuvor ein Photon auf die Kathode getroffen ist. Mit steigender Temperatur nimmt die Wahrscheinlichkeit der Elektronenemission zu. Durch Kühlung der Photovervielfacher kann diese thermische Elektronenemission, die die Hauptursache des Detektorrauschens darstellt, verringert werden.

2.5.2 Lawinenphotodiode

Die Lawinenphotodiode, im Englischen Avalanche Photodiode (APD) genannt, ist eine Halbleiter-Photodiode, deren pn-Übergang stark in Sperrrichtung vorgespannt ist. Bei einer Halbleiterphotodiode wird die Entstehung von Elektron-Loch-Paaren aufgrund des inneren photoelektrischen Effekts ausgenutzt. Trifft ein Photon mit ausreichend kurzer Wellenlänge auf einen Halbleiter, kann es ein Elektron aus dem Valenz- in das energetisch höher gelegene Leitungsband des Halbleiters anheben. Ist die Photodiode in Sperrrichtung vorgespannt, werden die generierten Ladungsträger durch das anliegende elektrische Feld getrennt, beschleunigt und abgesaugt. Ein Photostrom ist zu messen. Wie in Abbildung 2.7 dargestellt, tragen nur die in der Raumladungszone (RLZ) generierten Ladungsträger zu dem Photostrom bei sowie die, die in der Nähe der Raumladungszone generiert worden sind und in die Raumladungszone hineindiffundieren konnten. Ladungsträger, deren Diffusionslänge nicht ausreichend groß ist, rekombinieren bevor sie die Raumladungszone erreicht haben.

Die Beschleunigung, die die Ladungsträger erfahren, wächst mit steigender Sperrspannung. Durch Zusammenstöße mit den Gitteratomen erreichen die Ladungsträger jedoch eine bestimmte Sättigungsgeschwindigkeit. Wird die angelegte Sperrspannung am pn-Übergang dennoch weiter erhöht, haben die Ladungsträger ausreichend Energie, um bei ihren Zusammenstößen mit den Gitteratomen weitere Elektronen-Loch-Paare zu generieren. Befinden sich diese neu erzeugten Ladungsträger ebenfalls in der Raumladungszone oder in ihrem Grenzgebiet, so dass sie in die Raumladungszone hineindiffundieren können, werden auch sie durch das elektrische Feld beschleunigt und erzeugen wiederum weitere Ladungsträgerpaare. Es entsteht somit eine lawinenartige Vermehrung der Ladungsträgerpaare. Bei ausreichend hoher Spannung genügt ein einzelnes Photon, um eine solche Lawinenvermehrung in Gang zu setzen. Das einzelne Photon kann somit

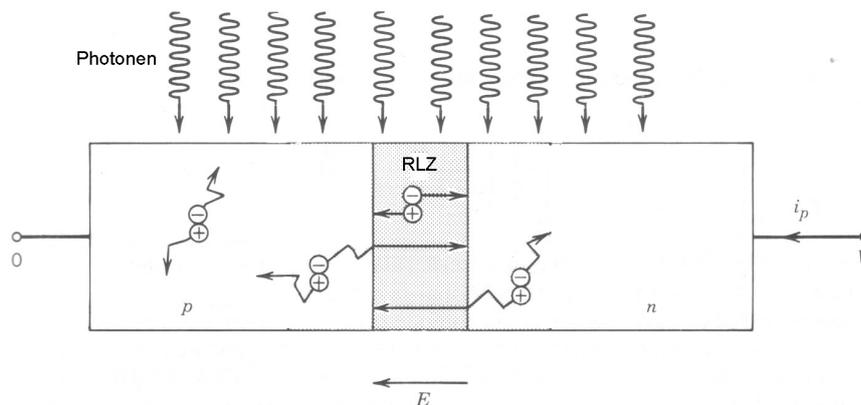


Abbildung 2.7: Prinzip einer Fotodiode nach *Saleh und Teich* [1991].

in Form eines Strompulses nachgewiesen werden. Die angelegte Sperrspannung wird in der Regel dicht unter der Durchbruchspannung des Halbleitermaterials gewählt.

Steigende Temperatur führt zu einer höheren Beweglichkeit der Gitteratome. Hierdurch erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass die beschleunigten Ladungsträger auf ein Gitteratom treffen, bevor sie eine ausreichend hohe Geschwindigkeit zur Erzeugung neuer Ladungsträger haben. Dies führt zu einer Abnahme des Photostroms. Um eine hohe und konstante Verstärkung zu erzielen, ist die Kühlung und Stabilisierung der Temperatur der Lawinendioden wichtig.

Eine Lawinendiode wird durch folgende Kenngrößen charakterisiert durch:

- Die Quanteneffizienz (QE) ist das Verhältnis aus der Anzahl der einfallenden Photonen zu der Anzahl der generierten Elektron-Loch-Paare.

$$\text{QE} = S \cdot E_g = \frac{\text{Anzahl der generierten Elektron-Loch-Paare}}{\text{Anzahl der eingefallenen Photonen}} \quad (2.21)$$

- Die spektrale Empfindlichkeit S gibt an, wie hoch die Quanteneffizienz in Abhängigkeit der Wellenlänge ist. Die Photonenenergie ist gegeben durch:

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda} \quad (2.22)$$

mit der Wellenlänge λ , der Lichtgeschwindigkeit c und dem Planckschen Wirkungsquantum h . Silizium hat eine Bandlücke von $E_g = 1,12 \text{ eV}$ und kann folglich Photonen mit einer Wellenlänge von $\lambda_{ph} \leq 1,1 \mu\text{m}$ und kleiner absorbieren.

- Der Ionisierungsfaktor der Elektronen α_E und der Ionisierungsfaktor der Ionen α_L gibt an, wie viele Elektron-Loch-Paare entstehen, während der entsprechende Ladungsträger eine bestimmte Strecke zurückgelegt hat. Das Ionisierungsverhältnis k ist das Verhältnis der beiden Ionisierungsfaktoren.

$$k = \frac{\alpha_L}{\alpha_E} \quad (2.23)$$

Die Diode wird möglichst so gestaltet, dass nur die Sorte an Ladungsträgern mit dem höheren Ionisierungskoeffizienten zur Ionisierung beiträgt, also $k = 0$ oder $k \rightarrow \infty$. Auch wenn dies eine geringere Verstärkung bedeutet, bringt dies einige entscheidende Vorteile mit sich [*Saleh und Teich, 1991*]:

- eine Verringerung des Detektorrauschens
- eine höhere Stabilität der Lawinenvermehrung und damit geringeres Risiko, einen Lawinendurchbruch auszulösen
- eine höhere Bandbreite

- Der Verstärkungs- oder Multiplikationsfaktor M ist annähernd gegeben durch

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{U}{U_B}\right)^\xi} \quad (2.24)$$

$$(2.25)$$

mit der angelegten Sperrspannung U und der Durchbruchspannung U_B . Der Exponent ξ liegt zwischen 1,5 und 6 [*Ebeling*, 1992].

- Die Totzeit τ_D ist die Zeit, die zwischen dem Auftreffen von zwei Photonen liegen muss, damit die Lawinen der beiden Photonen voneinander getrennt werden können. Die aus der Sperrschichtkapazität und den Zuleitungswiderständen resultierende Zeitkonstante τ_{RC} und die Diffusions- und Driftzeit der Ladungsträger τ_{diff} und τ_{drift} spielen dabei nur eine untergeordnete Rolle. Bestimmend ist die Zeitkonstante des Multiplikationsprozesses τ_M , die den Aufbau der Lawine beschreibt. Die Totzeit einer Lawinendiode ist deutlich größer als die einer Photovervielfacherröhre.

3 ALOMAR RMR-Lidar

3.1 ALOMAR

Die Forschungsstation ALOMAR ("Arctic Lidar Observatory for Middle Atmosphere Research") befindet sich auf der nordnorwegischen Insel Andøya bei 69° Nord und 16° Ost (siehe Abbildung 3.1).

ALOMAR wurde 1994 gegründet mit dem Ziel der Erforschung der polaren mittleren Atmosphäre. Das Observatorium, in dem vier Lidarsysteme und mehrere passive Fernerkundungssysteme installiert sind, liegt auf dem 379 m hohen Berg Ramnan. Zu ALOMAR gehören mehrere Radarsysteme, die sich in maximal 15 km Entfernung zum Observatoriumsgebäude befinden. Aufgrund der Abmessungen dieser Geräte von bis zu $1 \times 1 \text{ km}^2$ konnten sie nicht direkt an der Station aufgebaut werden. Der Start von Forschungsballons wird auf dem Startplatz in der Stadt Andenes durchgeführt. ALOMAR wurde in direkter Nähe zur Andøya Rocket Range aufgebaut, die sich an der 5 km entfernten Bucht Oksebåsen befindet. Dort ist der Start von bis zu 20 t schweren Forschungsraketen möglich. Durch die Kombination von hochauflösenden in-situ Experimenten, die während der Raketenflüge präzise Einzelmessungen liefern, mit den quasi-kontinuierlichen Fernerkundungsinstrumenten von ALOMAR ist eine umfassende Untersuchung der arktischen mittleren Atmosphäre möglich, wie sie in dieser Art weltweit einmalig ist.



Abbildung 3.1: Die Forschungsstation ALOMAR befindet sich nördlich des Polarkreises auf der nördlichsten Insel (Andøya) der Vesterålen.



Abbildung 3.2: Das ALOMAR-Observatorium im Oktober 2005 bei Vollmond und Polarlicht im Messbetrieb mit den beiden RMR-Laserstrahlen (geschwenkt) und dem Strahl des Troposphärenlasers (senkrecht). Im Hintergrund sind die Stadt Andenes (links) sowie die Insel Senja zu sehen [*Foto: privat*].

3.2 Anforderungen an das RMR-Lidar

Das aufwändigste Instrument im ALOMAR-Gebäude ist das RMR-Lidar, das seinen Namen nach den genutzten Streumechanismen Rayleigh-, Mie- und Ramanstreuung trägt. Das RMR-Lidar wurde 1994 in einem europäischen Gemeinschaftsprojekt des Leibniz-Institutes für Atmosphärenphysik im Ostseebad Kühlungsborn (IAP), des physikalischen Institutes der Universität Bonn, des Service d'Aéronomie des CNRS aus Verrières le Buisson (Frankreich) und des University College London (Großbritannien) aufgebaut. Heute wird das RMR-Lidar hauptsächlich vom IAP aus Kühlungsborn und dem Service d'Aéronomie unterhalten.

Das RMR-Lidar wurde mit dem Ziel aufgebaut, Informationen über die arktische Atmosphäre in einer Höhe zwischen 10 km und 100 km zu erhalten. Hierzu zählt die Beobachtung und Erforschung von leuchtenden Nachtwolken im Sommer und polaren Stratosphärenwolken im Winter, der Temperaturstrukturen sowie der Dynamik in diesem Höhenbereich. Da im Höhenbereich von etwa 20 km bis 60

km die so genannte Radarlücke besteht, in der keine Radarmessungen möglich sind, ist die Erforschung der Atmosphäre nur durch in-situ Messungen (z.B. durch Forschungsraketen) oder Lidarsysteme möglich. Mit den verhältnismäßig teuren in-situ Messmethoden lassen sich nur einzelne Messungen durchführen, während mit einem Lidar quasi-kontinuierliche Beobachtungen möglich sind.

Das ALOMAR RMR-Lidar ist ein komplexes System, das unter der Berücksichtigung mehrerer Gesichtspunkte konstruiert wurde [von Zahn et al., 2000]. Die wichtigsten sind:

- Der arktische Sommer ist eine wissenschaftlich interessante Periode u.a. wegen des Auftretens leuchtender Nachtwolken. Für Lidarmessungen stellt diese Jahreszeit eine besondere Herausforderung dar, da aufgrund der geografischen Breite auf Andøya die Sonne von Ende Mai bis Ende Juli nicht untergeht und gegen Mitternacht bis zu 3° über dem Horizont steht. Um dennoch selbst im Sommer Messungen durchführen zu können, muss das Lidar tageslichtfähig sein und das störende Hintergrundlicht herausgefiltert werden.
- Mit dem Lidar sollen Doppler-Windmessungen durchgeführt werden können. Da die Dopplerverschiebung bei einer Windgeschwindigkeit von 1 m/s nur 3,5 fm beträgt, müssen höchste Anforderungen an die spektrale Reinheit und Stabilität des Transmitters und der Empfangsoptik gestellt werden.
- Um die horizontale Komponente des Windes bestimmen zu können, muss die Blickrichtung des Lidarinstruments geneigt werden. Um sowohl die meridionale (Nord-Süd) als auch die zonale (Ost-West) Horizontalkomponente des Windes messen zu können, sind zwei schwenkbare Laser- und Teleskopsysteme erforderlich. Dadurch ist es außerdem möglich, entlang der Flugbahn von Forschungsraketen simultan Lidarmessungen durchzuführen.
- Um Rückschlüsse auf die Größenverteilung von Aerosol- und Wolkenpartikeln zu erhalten, werden mindestens drei Wellenlängen benötigt.
- Da Information über die Atmosphäre aus bis zu 100 km Höhe gewonnen werden sollen, muss das System über leistungsstarke Laser und effiziente Empfänger verfügen.
- Das Lidarinstrument soll soweit automatisiert sein, dass es von einer einzelnen Person bedient werden kann.

3.3 Sendezweig

Der Sendezweig verfügt über zwei baugleiche gepulste Nd:YAG¹-Leistungslaser, die bei der Grundwellenlänge 1064 nm, der ersten Harmonischen bei 532 nm und der zweiten Harmonischen bei 355 nm emittieren. Die Dauer eines Pulses beträgt ca. 10 ns, was einer Pulslänge von 3 m entspricht. Sind beide Leistungslaser im Betrieb, arbeiten sie alternierend mit einer Frequenz von 60,6 Hz. Ist nur ein Laser im Einsatz, ist er mit einer Frequenz von 30,3 Hz gepulst. Um eine hohe Frequenzstabilität beider Leistungslaser zu gewährleisten, was für Windmessungen eine entscheidende Voraussetzung ist, werden beide Leistungslaser durch einen einzigen Seedlaser stimuliert. Der Seedlaser gibt dabei die Frequenz vor, die von den Leistungslasern verstärkt wird. Eine Prinzipskizze der Laserbank und des Seedlasers ist in Abbildung 3.3 dargestellt. Der Seedlaser ist ein cw²-singlemode Nd:YAG-Diodenlaser, der auf der Flanke einer Absorptionslinie von Jod (siehe Abschnitt 2.4) frequenzstabilisiert wird. Er erreicht eine Frequenzgenauigkeit von $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \approx 10^{-9}$ und besser. Der Seedlaser emittiert bei einer Wellenlänge von $\lambda = 1064$ nm und $\lambda = 532$ nm. Das infrarote Licht wird zum Stimulieren der beiden Leistungslaser genutzt, die Emission bei 532 nm hingegen wird zur Stabilisierung der Frequenz anhand der Jodabsorption genutzt.

In den beiden Leistungslasern wird mit Hilfe eines KD*P³-Kristalls, der nicht-lineare optische Eigenschaften besitzt, die Grundfrequenz mit der zugehörigen Wellenlänge von $\lambda = 1064$ nm verdoppelt und verdreifacht. Der Lichtstrahl hat beim Austritt aus dem Laser einen Durchmesser von 10 mm. Über die zwei piezogesteuerten Strahlführungsspiegel M1 und M2 wird der Strahl in ein Aufweitungs-teleskop gelenkt, wo er auf einen Durchmesser von 200 mm aufgeweitet wird. Dies dient der Reduzierung der Strahldivergenz. Der aufgeweitete Strahl wird schließlich in die Teleskophalle geführt, von der aus er in die Atmosphäre gelenkt wird. Ca. 1 % des unaufgeweiteten Strahles wird hinter dem Spiegel M2 abgezweigt und in seine drei Spektralfrequenzen zerlegt. Der grüne Anteil wird auf 2 mm verschmälert und auf eine CCD⁴-Kamera gelenkt. Anhand der Lage des Strahles auf der CCD-Kamera werden die Spiegel M1 und M2 automatisch gesteuert [Enke, 1994]. Der Laserstrahl besitzt so eine exakte Lage und Richtung, mit der er in die Teleskophalle geführt wird. Weitere Informationen zu dem Sendezweig sind u.a. in *Fiedler und von Cossart* [1999] und in *von Zahn et al.* [2000] zu finden.

¹Nd:YAG: Neodym:Yttrium-Aluminium-Granat

²cw: continuous wave

³KD*P: Kalium Dideuterium Phosphat

⁴CCD Charge Coupled Device

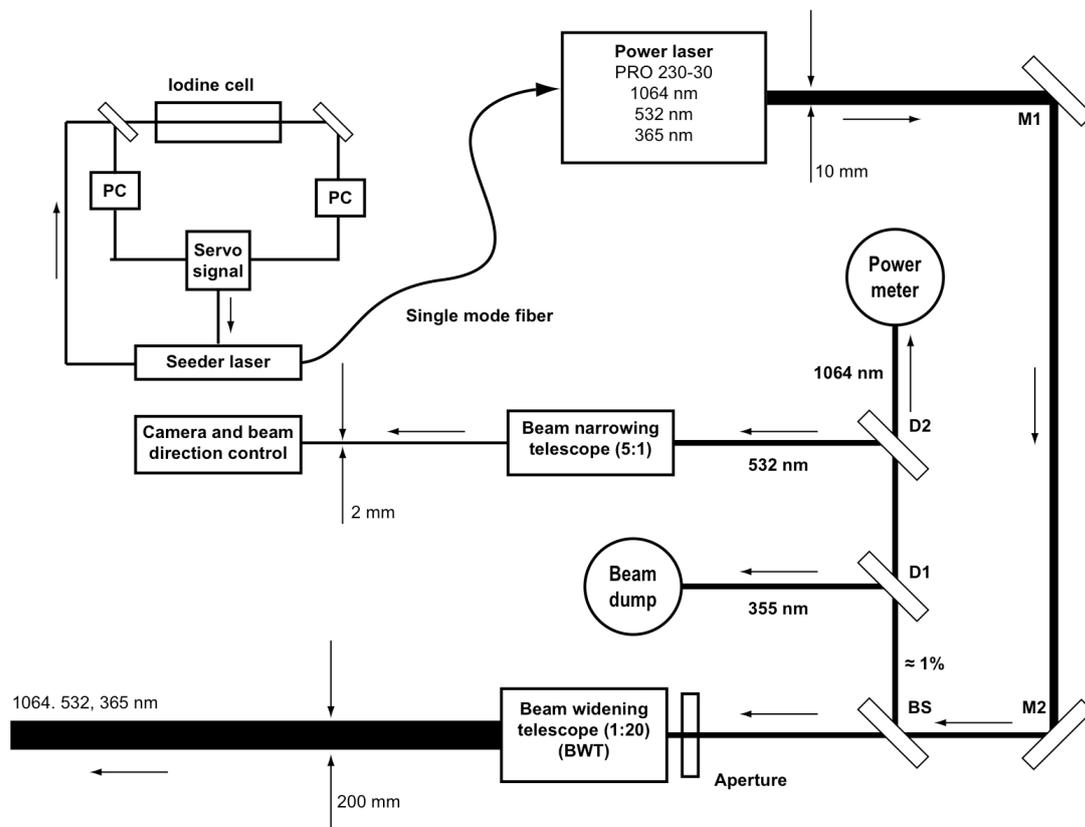


Abbildung 3.3: Prinzipskizze der Laserbank und des Seedlasers nach *von Zahn et al.* [2000]. Das Seedlaserlicht wird auf der Kante einer Jodzelle wellenlängenstabilisiert und zur Stimulation des Leistungslasers genutzt. Der Strahl des Leistungslasers wird durch ein Aufweitungsteleskop aufgeweitet, um die Divergenz zu verringern. Vor dem Aufweitungsteleskop wird ein Teil des Strahles durch den Strahlteiler BS abgezweigt und zur Strahlage stabilisierung genutzt.

3.4 Transferzweig

Die Aufgabe des Transferzweiges ist zum Einen, das aufgeweitete Laserlicht aus der Teleskophalle in die Atmosphäre zu lenken, und zum Anderen, das aus der Atmosphäre rückgestreute Licht mit Hilfe der Teleskopspiegel zu sammeln und in den Empfangszweig zu leiten. Dies ist in Abbildung 3.4 skizziert. Das RMR-Lidar verfügt über zwei schwenkbare Teleskope, deren Primärspiegel jeweils ein Gewicht von 1,5 t haben. Der Primärspiegel mit einem Durchmesser von 1,8 m und der Sekundärspiegel mit einem Durchmesser von 0,6 m bilden in jedem Teleskop eine quasi Cassegrain-Anordnung. Die Teleskope lassen sich jeweils um 30° aus dem

Zenit auslenken und in einem Quadranten um 90° im Azimut bewegen. Dabei wird bis auf den Sockel das komplette Teleskop bewegt. Durch das Südostteleskop (SET⁵) lässt sich der Südost-Quadrant und durch das Nordwestteleskop (NWT⁶) der Nordwest-Quadrant des Himmels abdecken.

Über drei motorgesteuerte Strahlführungsspiegel (BGM⁷) pro System wird das aus dem Laserraum kommende Licht in die Atmosphäre gelenkt. Die Strahlführungsspiegel werden automatisch so gesteuert, dass der Strahl für jede mögliche Position der Teleskope seine Position relativ zum Teleskopgesichtsfeld behält. Der BGM3 sitzt auf der Teleskopstruktur, so dass der Laserstrahl koaxial zum Blickfeld der Teleskope verläuft. Hierdurch wird es ermöglicht, dass der gesamte Strahl im Gesichtsfeld der Teleskope liegt und somit auch die Signale aus den unteren Höhen empfangen werden können.

Das aus der Atmosphäre rückgestreute Licht wird durch die Spiegel gesammelt und auf eine in der Fokalbox sitzende Glasfaser mit 1,5 mm Durchmesser fokussiert. Über die Glasfaser wird das Licht in den Empfangszweig geleitet. Die Fokalbox besteht aus insgesamt drei Zweigen: dem RMR-, dem CCD- und dem Na-Zweig. Das Licht wird durch Spiegel in die entsprechenden Kanäle geleitet. Der Na-Zweig gehört zu dem von einer amerikanischen und norwegischen Forschergruppe betriebenen Natrium-Lidar, das dieselben Teleskope benutzt. Um das RMR-Lidar auch bei Tageslicht betreiben zu können, besitzen die Teleskope ein relativ kleines Gesichtsfeld, das mit $180 \mu\text{rad}$ (18 m auf 100 km Entfernung) nicht viel größer als die Divergenz des Laserstrahls ($< 70 \mu\text{rad}$) ist. Ziel dieses kleinen Gesichtsfeldes ist es, möglichst wenig störendes Sonnenlicht einzufangen. Thermische Verformungen der Geräte und des Gebäudes können genügen, um den Strahl aus dem Teleskopgesichtsfeld herauszulenken. Damit dennoch ein kompletter Überlapp zwischen Teleskopgesichtsfeld und Laserstrahl garantiert wird, muss die Lage des ausgesandten Laserstrahls ständig nachjustiert werden.

Zur Strahllagestabilisierung wird aus etwa einem Kilometer Höhe empfangenes Licht in der Fokalbox auf eine CCD-Kamera abgebildet und der Intensitätsschwerpunkt bestimmt. Weicht dieser vom Sollpunkt ab, wird der Strahlführungsspiegel auf der Teleskopstruktur automatisch nachjustiert. Mit dem RMR-Lidar ist es möglich, Informationen über die Polarisation des empfangenen Lichtes zu erhalten. Hierzu wird, bevor das Licht in die Glasfaser eingekoppelt wird, ein linearer Polarisator in den Strahlengang gefahren. Detaillierte Informationen über den Transferzweig sind in [Baumgarten, 2001], [Wagner, 2000] und [Schöch und Baumgarten, 2003] zu finden.

⁵SET: **S**outh **E**ast **T**elescope

⁶NWT: **N**orth **W**est **T**elescope

⁷BGM: **B**eam **G**uiding **M**irror

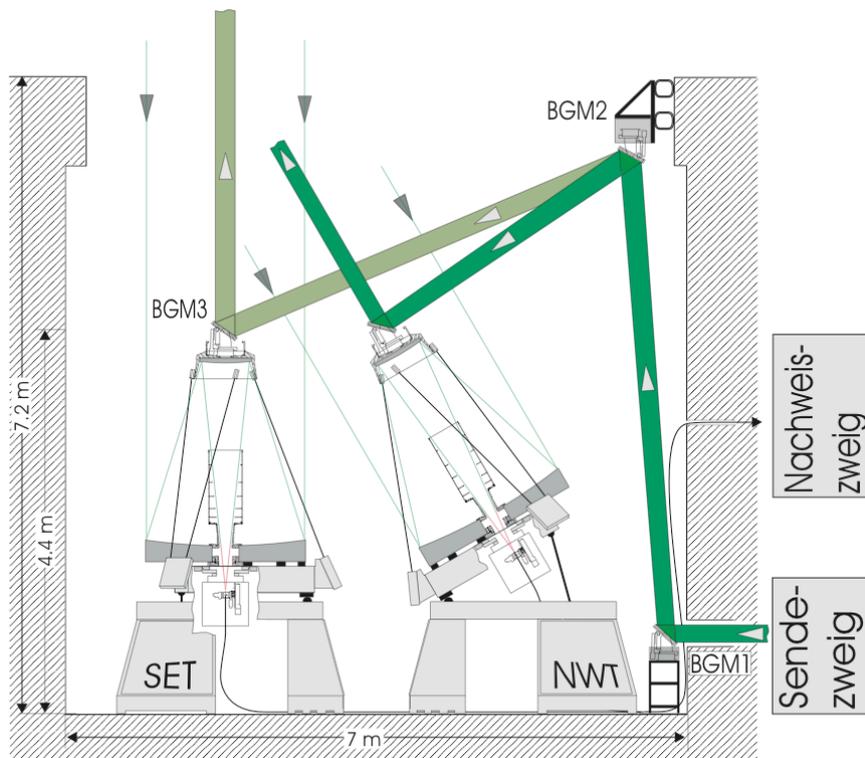


Abbildung 3.4: Prinzipskizze der Teleskope und der Strahlführung in der Teleskophalle [Baumgarten, 2001].

3.5 Nachweiszweig

Der Nachweiszweig besteht aus der optischen Bank und der Nachweiselektronik. Auf der optischen Bank wird das Licht spektral analysiert und von Photodetektoren in elektrische Signale umgewandelt. Die Signale werden von der Auswerteelektronik zeitabhängig ausgewertet. Aus Kostengründen ist der Nachweiszweig nicht wie der Sende- und Transferzweig in doppelter Ausführung vorhanden, sondern wird alternierend für beide Teleskope benutzt.

3.5.1 Optische Bank

Das in den Teleskopen gesammelte Licht wird über zwei Glasfasern auf die optische Bank geführt. Die optische Bank ist in Abbildung 3.5 skizziert. Sind beide Systeme im Einsatz, erfolgen die Laserpulse alternierend. Durch einen synchronisierten Faserselektor am Eingang der optischen Bank wird das jeweils aktive System ausgewählt. Das aus der Glasfaser kommende Licht wird auf den Chopper fokussiert. Der Chopper ist ein mechanisches Rad mit Flügeln, das den Strahlen-

gang des Lichtes periodisch unterbricht. Dies ist notwendig, um das Streulicht aus den unteren Höhen der Atmosphäre zu blockieren und die Detektoren somit vor Überlastung zu schützen. Der Chopper dient während der Messungen als Trigger für die Laser und somit als Trigger für das gesamte System. Die Chopperhöhe, d.h. die Zeit in der der Chopper das Licht abschneidet, ist gewöhnlich auf 13,5 km gesetzt. Hinter dem Chopper wird das Licht auf einen Durchmesser von etwa 36 mm aufgeweitet und annähernd parallelisiert. Das parallele Licht wird durch dichroitische Strahlteiler spektral analysiert und in die entsprechenden Nachweiswege geleitet. Da mit hochempfindlichen Detektoren gearbeitet wird und der dynamische Bereich des Atmosphärensignals den eines einzelnen Detektoren übersteigt, sind pro Nachweisweg zum Teil mehrere Kanäle vorhanden. Das Signal wird mit Hilfe von Intensitätsstrahlteilern auf die verschiedenen Kanäle und somit auf mehrere Detektoren aufgeteilt. Die Detektoren sind Photovervielfacher und Lawinenphotodioden, die jeweils im Photonenzählmodus betrieben werden. Die optische Bank verfügt über insgesamt 12 Nachweiskanäle, die in Tabelle 3.1 kategorisch aufgelistet sind.

Um den Messbereich der intensitätskaskadierten Detektoren zu wählen, ist jeder Detektor mit einem elektrischen Shutter (Gating) ausgestattet. Über diesen Shutter, der auf die Laserpulse getriggert ist, lässt sich die Hochspannung der ersten Dynode des entsprechenden Photovervielfachers bzw. die Spannung an der Grenzschicht der entsprechenden Lawinenphotodioden ausschalten und somit der

Tabelle 3.1: Übersicht über die Nachweiskanäle des RMR-Lidar.

	detektierte Wellenlänge [nm]	emittierte Wellenlänge [nm]	Detektor- typ
8 Rayleigh/Mie-Kanäle:			
APD, APL	1064	1064	APD
DH, DL	532	532	APD
DM, DL	532	532	PMT
AH, AL	355	355	PMT
2 Vibrationsramankanäle:			
DS	608	532	APD
AU	387	355	PMT
2 Rotationsramankanäle:			
TR1	529,1	532	PMT
TR2	530,4	532	PMT

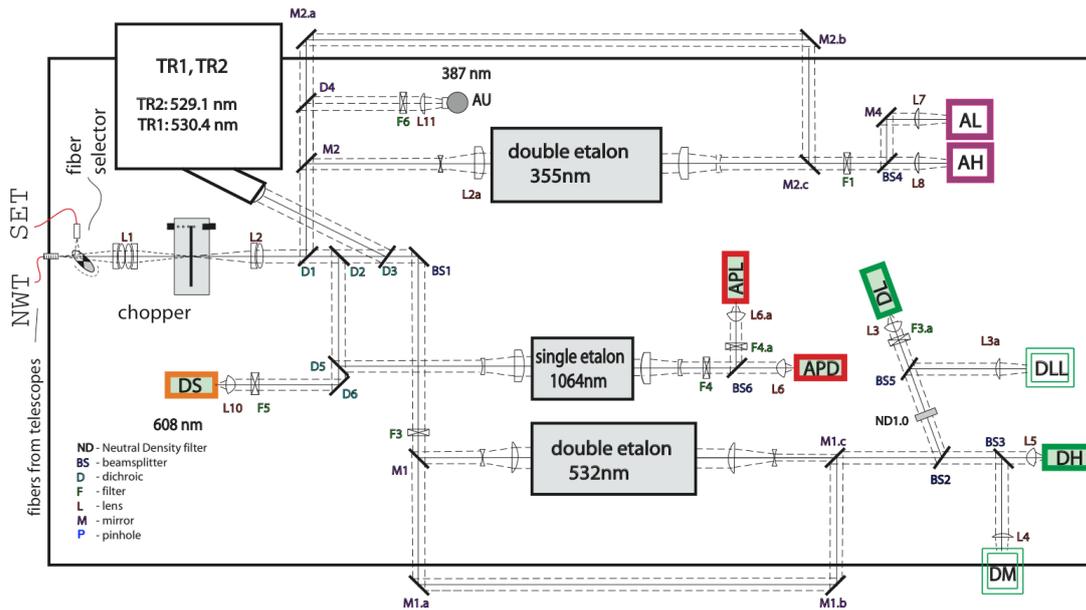


Abbildung 3.5: Prinzipskizze der optischen Bank im Herbst 2006. Die Bank ist ein $3,6 \text{ m} \times 1,5 \text{ m}$ großer und $1,5 \text{ t}$ schwerer Spezialtisch.

Vervielfachungs- oder Lawinenprozess verhindern. Die Shutterhöhe, d.h. die Zeit, in der die Hochspannung abgeschaltet ist, kann über eine Software für jeden Detektor einzeln gesetzt werden.

Da das Licht nach seiner spektralen Aufteilung durch die dichroitischen Strahlteiler noch keine ausreichend kleine Bandbreite hat, um den Hintergrund genügend herauszufiltern, müssen zusätzliche Filter in den Strahlengang gesetzt werden. Die Filter müssen so gewählt werden, dass die Bandbreite klein genug ist, um das störende Hintergrundlicht herauszufiltern, und groß genug, dass die Dopplerverbreiterung der Spektrallinie transmittiert wird. Während Nachtmessungen stellen vor allem das Mondlicht, die Polarlichter und das menschlich erzeugte Lampenlicht unerwünschte Lichtquellen dar. Als Filter werden Interferenzfilter mit einer Bandbreite von $0,1 \text{ nm}$ bis 1 nm eingesetzt. Da für Messungen am Tage diese Filterung nicht ausreichend ist, müssen zusätzliche Anstrengungen unternommen werden, um das störende Sonnenlicht herauszufiltern. Hierzu sind die Kanäle, die auch für Tageslichtmessungen eingesetzt werden, zusätzlich mit schmalbandigen Fabry-Perot-Interferometern (Etalons) versehen, die eine Bandbreite von etwa 4 pm haben. Für die Nachtmessungen würden die Etalons das Signal im 532 nm -Zweig und im 355 nm -Zweig unnötig abschwächen. Um in diesen Kanälen optimale Nacht- und Tagesmessungen durchführen zu können, verfügen sie über zwei Lichtwege. Für Tageslichtmessungen wird das Licht im 532 nm -Zweig über den Spiegel M1 durch das Doppetalon geleitet. Für Nachtmessungen wird der

Spiegel M1 entfernt und das Licht über einen Umweg über die Umlenkspiegel M1.a, M1.b und M1.c geführt. Der Spiegel M1.c wird für Tageslichtmessungen entfernt. Im 355 nm-Zweig erfolgt dies äquivalent.

3.5.2 Detektoren und die Zähl elektronik

Als Detektoren werden Photoervielfacherröhren vom Typ "Hamamatsu R4220P select" und Lawinenphotodioden von PerkinElmer vom Typ "SPCM-AQR 15" verwendet, die im Photonenzählmodus betrieben werden.

Das elektrische Signal aus den Photoervielfacherröhren wird in einen Vorverstärker um das Sechsfache verstärkt. Das verstärkte Signal wird aus dem Detektorraum in den Kontrollraum geführt, wo sich der Hauptverstärker sowie die Zähl elektronik befinden. Der Verstärkungsfaktor des Hauptverstärkers vom Typ "NIM Model 612AM 6-Channel Photomultiplier Amplifier" lässt sich zwischen 2,5 und 45 für jeden Kanal stufenlos anpassen. Die Zähl elektronik ist von dem am RMR-Lidar beteiligten Service d'Aéronomie entworfen, gebaut und mit einer Auswertesoftware versehen worden. Die Diskriminatorschwelle ist durch die Empfindlichkeit der Zähl elektronik gegeben, die die Pulse ab einer bestimmten Höhe zählt. Es wird kein separater Diskriminator benutzt. Die Pulshöhe kann über den Verstärkungsfaktor der Hauptverstärker angepasst werden. Die Lawinenphotodioden sind als Module vorhanden, die bereits einen integrierten Vorverstärker und Impulsformer, der TTL-Pulse liefert, besitzen. Die Zähl elektronik ist für den Gebrauch von Photoervielfacherröhren vorgesehen, so dass die TTL-Pulse der Lawinenphotodiodenmodule durch einen Differenzierer auf die Form von PMT-Pulsen gebracht werden.

Da die vorhandene Elektronik nach mehr als zehn Jahren Einsatz einige Mängel aufweist, ist für zwei Kanäle probeweise eine neue Zähl elektronik der Firma LICEL gekauft worden. Die LICEL-Elektronik zählt parallel zur französischen Elektronik in den Kanälen DH und DL. Hinter dem Hauptverstärker sind zwei Signal-Ausgänge, so dass das Signal dort abgegriffen und sowohl in die französische als auch in die LICEL-Zähl elektronik gegeben werden kann. Die LICEL-Elektronik ist so gestaltet, dass das Signal aus dem Photoervielfacher unverstärkt in die Elektronik gegeben werden soll. Daher muss das verstärkte Signal wieder um -46 dB abgeschwächt werden.

3.5.3 Doppler-Rayleigh-Jodspektrometer (DoRIS)

Mit dem ALOMAR RMR-Lidar sollen nach der in Abschnitt 2.4 beschriebenen Kantenmethode im 532 nm-Zweig Winde gemessen werden. Hierzu kann in den Lichtweg des DL- und DLL-Kanals eine Jod-Molekulardampf-Absorptionszelle (im Folgenden verkürzend als Jodzelle bezeichnet) hineingeschoben werden. Steht die Jodzelle im Strahlengang werden die Kanäle DW und DWL genannt. DH und

DM dienen dabei als Referenzkanäle. Sie detektieren das gesamte Signal, ohne dass das Licht die Jodzelle durchlaufen hat. Die Detektoren DW und DL weisen das durch die Jodzelle abgeschwächte Signal nach. Als Referenzsignal wird das Licht des auf der Jodflanke stabilisierten Seedlasers benutzt. Der Seedlaser gewährleistet eine Frequenzstabilität von mindestens $\frac{\Delta\nu}{\nu} = 10^{-9}$ für die Wellenlänge 532 nm. Dies entspricht einer Wellenlängenverschiebung von $\Delta\lambda = 0,532$ fm, die um das etwa Zehnfache kleiner ist als die Dopplerverschiebung bei einer Windgeschwindigkeit von 1 m/s. Das Seedlaserlicht wird stark abgeschwächt auf die optische Bank eingekoppelt. Im Chopperblatt befindet sich eine Nut, so dass das Seedlaserlicht nur in einem Höhenbereich zwischen 180 km und 260 km, in dem kein Nutzsignal empfangen wird, auf die optische Bank gelangt. Dieser Aufbau der optischen Bank für die Windmessungen wird als Doppler Rayleigh Iodine Spectrometer (DoRIS) bezeichnet und ist in Abbildung 3.6 skizziert. Die für die Windmessungen benötigten Nachweiszweige sind grün hinterlegt.

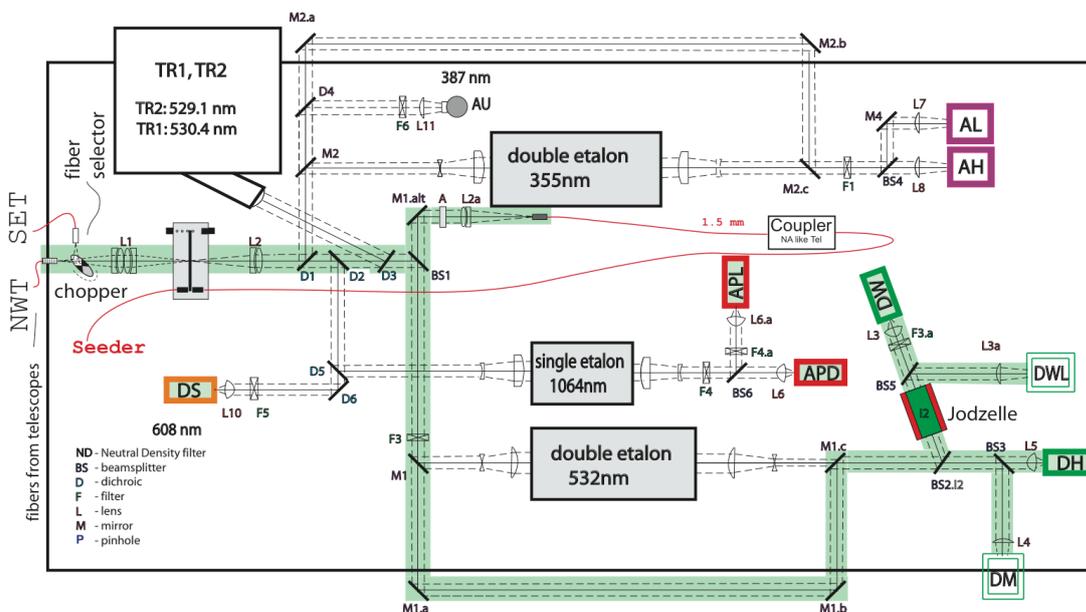


Abbildung 3.6: Prinzipskizze der optischen Bank in der DoRIS-Konfiguration mit eingesetzter Jodzelle. Der Strahlengang zum DoRIS-System ist grün hinterlegt. Das Referenzsignal des Seedlasers wird durch den Chopper geschaltet. Es wird koaxial zum Strahlengang des in den Teleskopen gesammelten Lichts über die Rückseite eines hochreflektierenden Spiegels eingekoppelt.

3.6 Simulierte Atmosphärenmessungen

Um außerhalb der Atmosphärenmessungen auch Testmessungen mit einem bekannten Signal durchzuführen, kann das Licht einer LED⁸ auf die optische Bank eingekoppelt werden. Ein Funktionsgenerator wird ähnlich wie die Laser während Atmosphärenmessungen über den Chopper getriggert. Der Funktionsgenerator liefert Pulse an die LED und schaltet sie dadurch. Die Pulsform und -dauer ist so gewählt, dass das LED-Signal ähnlich wie das rückgestreute Atmosphärensignal ein Abklingverhalten zeigt. In Abbildung 3.7 sind ein typisches Atmosphärensignal und ein LED-Signal nebeneinander dargestellt. Das Rayleigh-Signal ist in der Atmosphärenmessung zwischen etwa 30 km und 80 km durch eine höhere Zählrate zu erkennen, die durch das LED-Licht während der Testmessungen simuliert wird. Zwischen 80 km und 180 km ist das Hintergrundrauschen zu sehen, bevor zwischen 180 km und 260 km das Signal des eingekoppelten Seedlaserlichtes zu erkennen ist.

Die LED befindet sich im Kontrollraum, wo ihr Licht abgeschwächt in eine Glasfaser eingekoppelt und über diese in die Teleskophalle geführt wird. In der Teleskophalle wird aus der Fokalbox des Nordwest-Teleskops die Glasfaser des

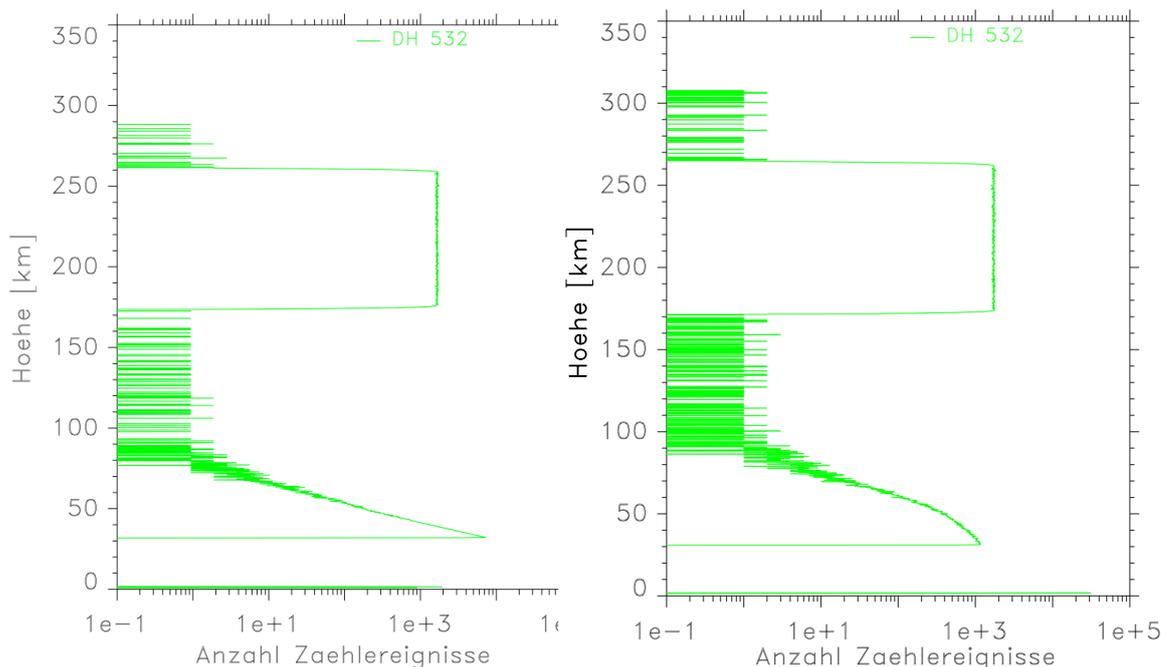


Abbildung 3.7: Das Rückstreusignal aus einer Atmosphärenmessung (links) und das LED-Signal (rechts). In beiden Fällen wird zusätzlich Seedlaserlicht im Höhenbereich von 170 km bis 260 km über den Chopper eingekoppelt.

⁸LED - **L**ight **E**mitting **D**iode - Licht emittierende Diode

RMR-Zweigs abgetrennt und über einen Faserkoppler mit der aus dem Kontrollraum kommenden Glasfaser verbunden. Auf diesem Weg wird das LED-Licht genauso wie das Licht, das während Atmosphärenmessungen durch das Teleskop gesammelt wird, in den Detektorraum geführt, dort in die optische Bank eingekoppelt und von den Detektoren in elektrisch zählbare Pulse umgewandelt. Der Aufbau ist in Abbildung 3.8 schematisch skizziert. Das Licht der LED ist für Testmessungen im 532 nm-Zweig vorgesehen. Mithilfe der simulierten Atmosphärenmessungen kann das System unter identischen Bedingungen in diesem Zweig getestet und untersucht werden. Ein Überblick über alle während dieser Arbeit durchgeführten LED-Testmessungen ist in Anhang A gegeben.

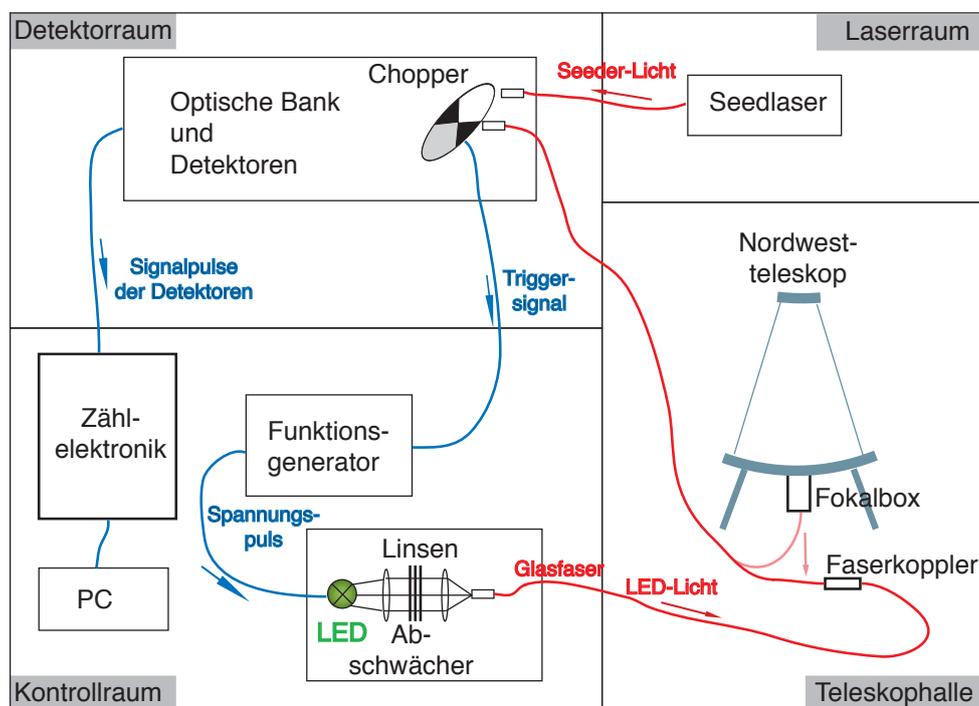


Abbildung 3.8: Schematischer Systemaufbau für die simulierten Atmosphärenmessungen. Das Licht der LED wird durch eine Glasfaser vom Kontrollraum in die Teleskophalle geführt. Durch die Glasfaser, die auch für die Atmosphärenmessungen genutzt wird, gelangt das Licht bis auf die optische Bank in den Detektorraum.

4 Spezielle Systemanforderungen für Windmessungen

Das ALOMAR RMR-Lidar ist für die mittel- und langfristige Beobachtung der mittleren Atmosphäre entwickelt worden. Bei der Aufnahme dieser Zeitreihen ist insbesondere auf die Kontinuität der Systemeigenschaften zu achten. So wird beim Austausch veralteter oder fehlerhafter Komponenten stets untersucht, inwieweit sich die Umbauten auf die abgeleiteten atmosphärischen Parameter auswirken. Von zentraler Bedeutung des Gesamtsystems ist insbesondere die Datenerfassung durch die Kombination von Detektor und Nachweiselektronik. Im Folgenden werden anhand von zwei Beispielen erhoffte Verbesserungen bzw. die notwendige Genauigkeit des Nachweiszweigs dargestellt.

4.1 Spikes

Mithilfe der Zählerlektronik und einer an diese angepassten Software werden die von den Photodetektoren gelieferten elektrischen Pulse zeitaufgelöst und somit höhenaufgelöst gezählt und in einer Datei, die Record genannt wird, gespeichert. Die Zählerlektronik ist so eingestellt, dass in einem Record jeweils die Signale von 2000 Laserpulsen aufsummiert und gespeichert werden. Die vertikale Auflösung beträgt 150 m ($= 1\mu\text{s}$). Die Zählerlektronik ist seit 1994 im Einsatz und weist vermutlich aufgrund des Alters einige Mängel auf. In einzelnen Records ist in aneinander grenzenden Bins eine erhöhte Zählrate zu erkennen, die eine oder mehrere Größenordnung höher ist als die durchschnittliche Zählrate in diesem Höhenbereich. Dies sind Zählfehler, deren Ursprung nicht genau bekannt ist, aber in der Zählerlektronik

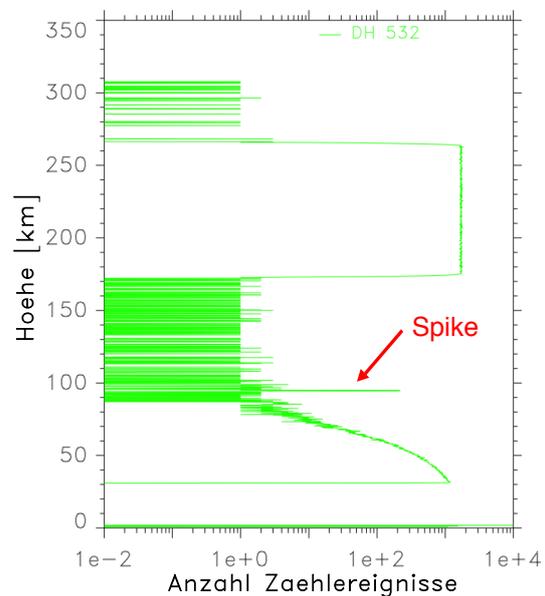


Abbildung 4.1: LED-Testmessung vom 23.05.2006 mit Spike bei 92 km

vermutet werden. Das Auftreten der Spikes scheint sowohl zeitlich als auch auf den Höhenbereich betrachtet willkürlich zu sein. In Abbildung 4.1 ist beispielhaft ein Record mit einem Spike bei etwa 95 km dargestellt.

Da die Datenauswertung zum Großteil automatisch stattfindet, stellen die Spikes ein großes Problem dar. Für viele Berechnungen werden die Records für einen bestimmten Zeitraum aufsummiert. Tritt dabei ein Spike auf, kann dies einen verfälschenden Einfluss auf die Ergebnisse haben. Zum Beispiel werden Temperaturprofile aus den gemessenen Dichteprofilen bestimmt. Die Dichte ist dabei proportional zum Rückstreuprofil. Auch wenn die Profile zur Bestimmung der Temperatur sowohl über die Höhe als auch über die Zeit geglättet werden, führen Spikes, die z.T. um einige Größenordnungen aus den Profilen herausragen, zu einer scheinbaren Senkung der Temperatur. Dies kann 30 Kelvin und mehr betragen [A. Schöch, *persönliche Mitteilung*, 2006]. Spikes, die im Rayleighbereich auftreten, haben dabei stärkere Auswirkungen auf die Ergebnisse als Spikes, die im Untergrundbereich auftreten. Im langen Mittel haben Spikes einen weniger starken Einfluss. Für kurze Integrationszeiten, wie sie zum Beispiel zur Untersuchung kurz-periodischer Prozesse benötigt werden, haben sie dagegen einen signifikanten Einfluss. Dies gilt auch für die Windmessungen, wo es auf ein stabiles Kanalverhältnis ankommt. Im Rahmen dieser Arbeit soll untersucht werden, ob die Spikes von der vorhandenen alten und der neuen LICEL-Elektronik gleichermaßen gezählt werden oder ob sie eventuell nur innerhalb der vorhandenen Elektronik entstehen. Die Spikes könnten auf ein generelles fehlerhaftes Zählverhalten der Elektronik hindeuten.

4.2 Windmessungen

Für die Windmessungen ist eine hohe Genauigkeit der Detektoren und der Elektronik ein entscheidender Faktor. Dazu ist der optische Nachweiszweig in der DoRIS-Konfiguration (siehe Abschnitt 3.5.3) mit einer Jod-Molekulardampf-Absorptionszelle versehen. Das Transmissionsspektrum dieser Jodzelle ist in Abbildung 4.2 gegeben.

Die Jodflanke ist so optimiert, dass eine Dopplerverschiebung der Wellenlänge um $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 10^{-8}$, die durch Wind mit der Geschwindigkeit $v = 1,5$ m/s verursacht wird, einer Verhältnissenauigkeit von $\frac{\Delta I}{I} = 10^{-3}$ hinter der Jodzelle entspricht. Zur Verbesserung der Messungen sollen zunächst die Photovervielfacherröhren in den DoRIS-Kanälen gegen Lawinenphotodioden ausgetauscht werden. Von den Lawinenphotodioden wird eine höhere Zählrate erwartet, wodurch sich der statistische Fehler verringern und die Genauigkeit erhöhen lässt. Um die Dopplerverschiebung, die als $\frac{\Delta I}{I} = 10^{-3}$ gegeben ist, von Empfängerseite auflösen zu können, muss der relative statistische Zählfehler $\frac{\Delta N}{N}$ kleiner als 10^{-3} gehalten werden, was mindestens $N = 10^6$ Zählereignisse pro Detektor erfordert. Zunächst soll der Auf-

bau mit den Photovervielfachern als Detektor auf seine Genauigkeit und Stabilität hin untersucht werden. Anschließend sollen im DoRIS-Zweig der DH-Kanal und DL-Kanal mit Lawinenphotodioden bestückt sowie entsprechend modifiziert und ebenfalls untersucht werden. Des Weiteren soll die alte Elektronik mit der neuen LICEL-Elektronik verglichen und auf ihre Genauigkeit und Zähleffizienz hin untersucht werden. Die LICEL-Elektronik lief sowohl in der Konfiguration mit den Photovervielfacherröhren als auch in dem Aufbau mit den Lawinenphotodiode dauerhaft mit.

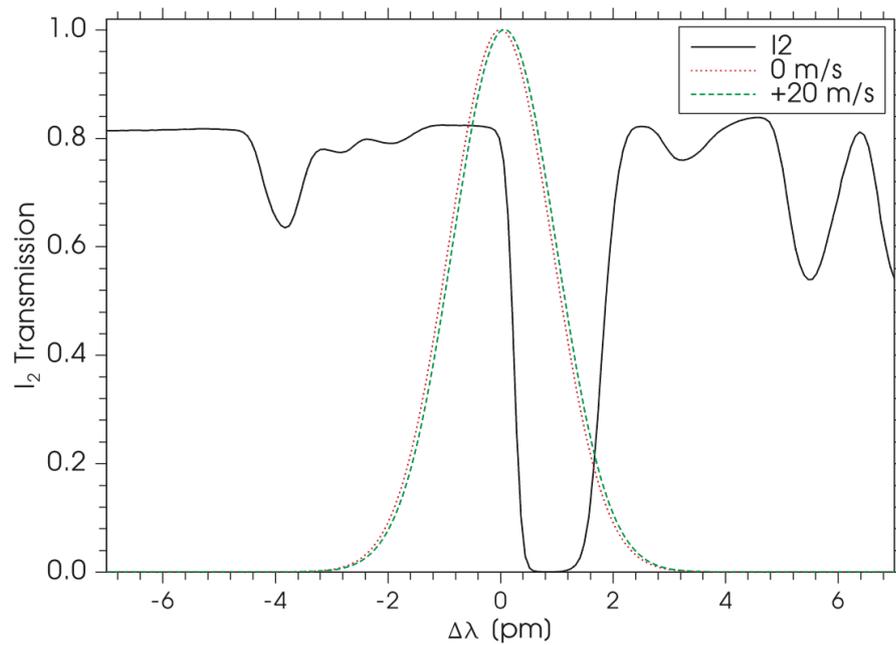


Abbildung 4.2: Das Transmissionsspektrum der Jodzelle sowie ein dazu überlagertes dopplerverschobenes und ein nicht dopplerverschobenes Rückstreusignal.

5 Versuchsdurchführung und Ergebnisse

Während dieser Arbeit wurden in den Kanälen DH und DL die Detektoren ausgetauscht. Um Informationen über die Zähleigenschaften der neuen Lawinenphotodioden im Vergleich zu den alten Photovervielfacherröhren zu erhalten, wurde das Auftreten der Spikes, die Zähleffizienz, die Linearität und Totzeit sowie die Stabilität des Systems sowohl vor als auch nach dem Umbau untersucht. Darüber hinaus wurde das Zählverhalten der neuen LICEL-Zählelektronik im Vergleich zur vorhandenen Zählelektronik in den Kanälen DH und DL betrachtet. Hierbei wurde das Auftreten der Spikes, die Zähleffizienz, die Linearität und Stabilität der beiden Zählelektroniken untersucht. Die Grafiken wurden mit PV-Wave Skripten und Matlab erstellt.

5.1 Austausch der Detektoren und Umgestaltung der optischen Bank

Für den Austausch der Photovervielfacherröhren gegen Lawinenphotodioden in den Kanälen DL bzw. DW und DH war eine Umgestaltung des 532 nm-Zweigs der optischen Bank nötig. Abbildung 5.1 zeigt die optische Bank in ihrer ursprünglichen Konfiguration mit den Photovervielfachern als Detektoren (oben) sowie nach der Umgestaltung mit den Lawinenphotodioden als Detektoren (unten). Die für die Arbeit relevanten Nachweiszweige sind grün hinterlegt.

Bei der Umgestaltung der optischen Bank wurde die polarisationsabhängige Aufteilung des Lichts durch den Strahlteiler BS2.I2 berücksichtigt. Während mehrerer Testmessungen wurde nachgewiesen, dass dieser Strahlteiler die spezifizierte polarisationsunabhängige Aufteilung nicht beim geplanten Einfallswinkel von 45° sondern erst bei einem Einfallswinkel von 35° erreicht. Diese polarisationsabhängige Aufteilung lässt sich besonders leicht durch unterschiedliche LED-Testmessungen (siehe Abschnitt 3.6) zeigen. Diese werden im Folgenden beschrieben.

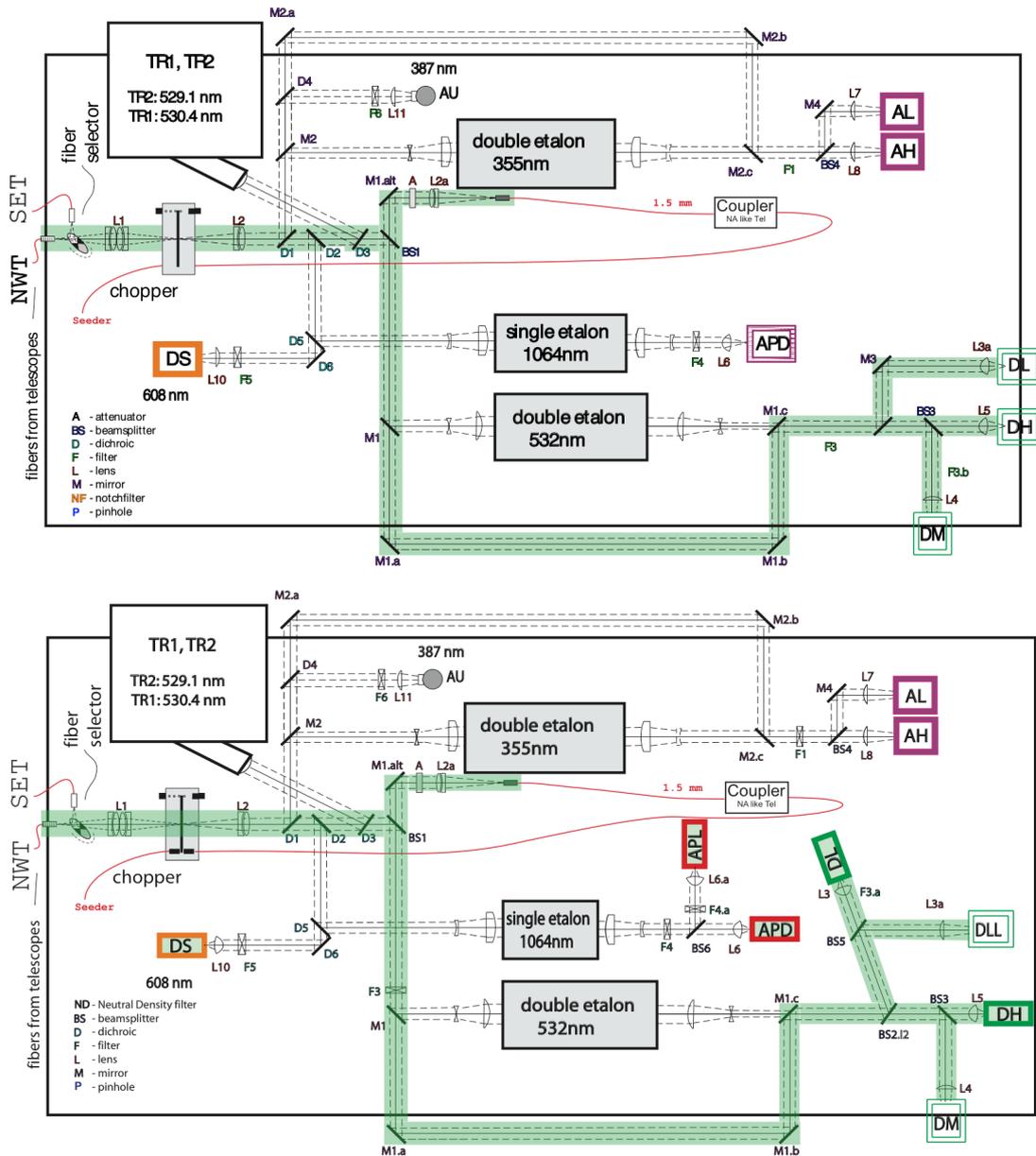


Abbildung 5.1: *Oben:* Die optische Bank vor der Umgestaltung. Die Kanäle DL, DH und DM sind mit Photovervielfacherröhren versehen. *Unten:* Die optische Bank nach der Umgestaltung. Die Kanäle DL und DH sind mit Lawinenphotodioden versehen. Zusätzlich wurden Strahlteiler ausgetauscht und die Geometrie verändert, damit der Strahlteiler BS2.I2 unabhängig von der Polarisierung des Lichtes teilt. Die für diese Arbeit relevanten Nachweiszweige sind mit grün hinterlegt.

Vor dem Umbau wurden LED-Testmessungen durchgeführt und das Verhältnis der Kanäle DL zu DH gebildet. Dies ist in Abbildung 5.2 für die Messung am 23. Mai 2006 6.33 - 9.31 UTC dargestellt. Das Signal wurde über eine Stunde Messzeit aufsummiert, um den statistischen Fehler zu vermindern. Die Ordinate gibt den "Höhenbereich" des detektierten Signals an, während die Abszisse das Verhältnis DL/DH zeigt.

Das Kanalverhältnis für das LED-Licht ist zwischen 30 km und 70 km, das für das Seedlaserlicht bei 180 km bis 260 km zu erkennen. In den weiteren Höhenbereichen wurde nur Hintergrundlicht und Rauschen detektiert, so dass das Verhältnis dort verrauscht ist. Im Seedlaserbereich weisen die Kanäle ein Verhältnis von etwa 1,52 auf, während sie für das LED-Licht ein Verhältnis von ca. 1,72 zeigen. Dabei ist zu erkennen, dass sich das Verhältnis der beiden Kanäle für das LED-Licht und für das Seedlaserlicht von einander unterscheiden.

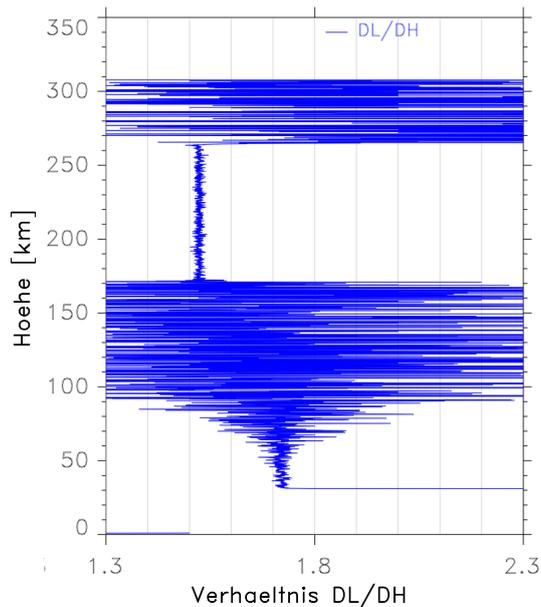


Abbildung 5.2: Verhältnis DL/DH für Photovervielfacherröhren. Die Messung fand am 23. Mai statt. Die Integrationszeit beträgt eine Stunde.

Das Seederlicht ist durch die Einkopplung über M1.alt und durch BS1 (siehe Abbildung 5.1) stark polarisiert. Das LED-Licht dagegen ist durch die Einkopplung über verschiedene Multimode-Fasern fast gar nicht polarisiert. Es lässt sich deshalb vermuten, dass das Licht nicht durch alle Komponenten auf der optischen Bank gleichermaßen aufteilt wird, sondern dass es polarisationsabhängig transmittiert oder reflektiert wird. Es sind weitere Testmessungen unter identischen Bedingungen jedoch mit dem Unterschied durchgeführt worden, dass ein Polarisator vor den Strahlteiler BS2.I2 gestellt wurde (siehe Abbildung 5.1). Für verschiedene Winkel ϕ zwischen Polarisationsrichtung des transmittierten Lichts und der Vertikalen wurden Testmessungen durchgeführt. Die Beobachtungen für $\phi = 0^\circ$ und $\phi = 45^\circ$ zeigt Abbildung 5.3. Mit Polarisator beträgt das Kanalverhältnis für das Seederlicht bei einem Winkel $\phi = 0^\circ$ etwa 1,72 und bei $\phi = 45^\circ$ etwa 1,75. Für das LED-Licht variiert das Verhältnis zwischen 1,65 bei $\phi = 0^\circ$ und 1,73 bei $\phi = 45^\circ$. Es ist zu erkennen, dass sich das Verhältnis der Kanäle sowohl für das LED-Licht als auch für das Seederlicht ändert. Der Polarisator hat also Einfluss auf das Teilungsverhältnis des Lichtes.

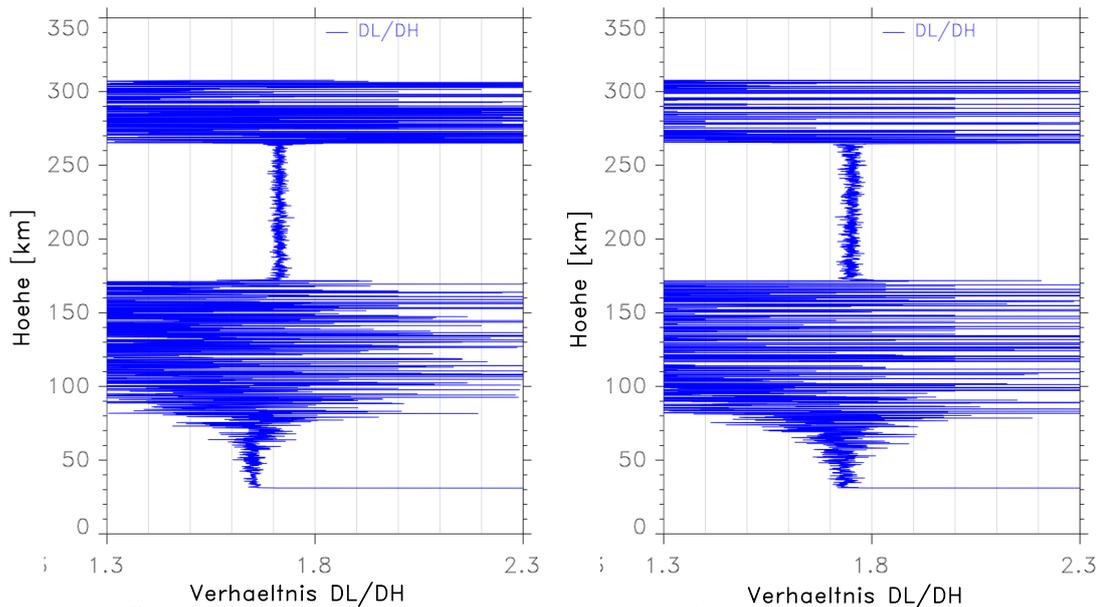


Abbildung 5.3: Verhältnis DL/DH. Links mit Polarisator bei $\phi = 0^\circ$ vom 28. Mai 2006, rechts mit Polarisator bei $\phi = 45^\circ$ vom 23. Mai 2006. Es wurden jeweils Daten über eine Stunde aufsummiert. Die Detektoren waren Photovervielfacherröhren.

Nach der Umgestaltung der optischen Bank hat am 8. Juni 2006 eine erneute Testmessung stattgefunden. Das Signalverhältnis ist auf die selbe Weise wie zuvor beschrieben gebildet worden. Dies ist in Abbildung 5.4 gezeigt. Das Signalverhältnis beträgt für das Seederlicht 1,48 und für das LED-Licht 1,63. Bei dieser Messung war die Verstärkung des DH-Kanals nicht richtig angepasst, so dass die Pulse in diesem Kanal doppelt gezählt wurden. Dies wurde für die Auswertungen berücksichtigt und korrigiert. Detailliertere Informationen hierzu sind Anhang B zu entnehmen.

Die neue Konfiguration zeigt nur eine leichte Verbesserung im Vergleich zum vorherigen Aufbau. Der Strahlteiler BS2.I2 kann also nicht die alleinige Ursache für die unterschiedliche Aufteilung des Lichtes sein. Die Ursache hierfür ist derzeit unbekannt. Es handelt sich möglicherweise um Interferenzeffekte an den dünnen Schichten der Strahlteiler. Das LED-Licht ist im Vergleich zum Seedlaserlicht unkohärent und breitbandig. Seine Bandbreite wird durch den Filter F3 bestimmt und beträgt etwa 150 pm. Das Seedlaserlicht dagegen ist kohärent und schmalbandig (ca. 0,5 fm). Die Aufteilung des Lichtes ist für die Untersuchungen in dieser Arbeit nicht entscheidend. Die Auswirkungen werden jedoch in den Abschnitten 5.1.4 und 5.2.4 noch genauer dargestellt.

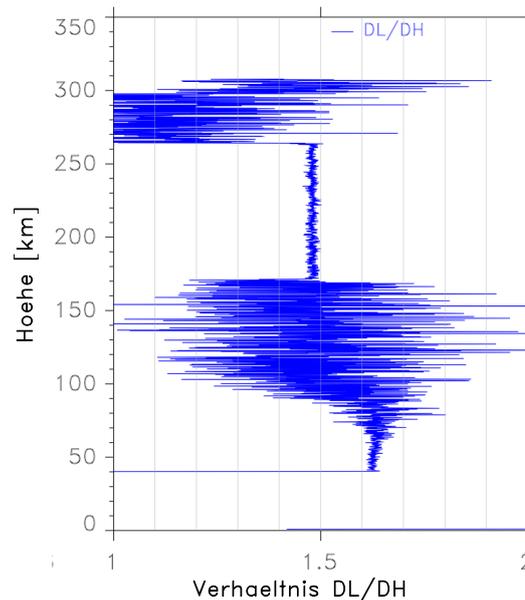


Abbildung 5.4: Das Signalverhältnis DL/DH für die neue Konfiguration der optischen Bank mit Lawinenphotodioden als Detektor. Diese Messung wurde am 8. Juni 2006 durchgeführt. Es wurden Daten aus einer Stunde Messzeit aufsummiert.

5.1.1 Spikes

Es wurde untersucht, ob sich das unerwünschte Auftreten von Spikes nach dem Umbau der Detektoren verändert hat. Hierzu wurden alle in dem Zeitraum zwischen 16. Mai und 9. August 2006 durchgeführten Testmessungen und alle in dem Zeitraum 16. Mai bis 26. Juli 2006 durchgeführten Atmosphärenmessungen auf Spikes hin untersucht. Dies ist visuell geschehen, indem alle Records einzeln durchgesehen wurden. Um einen Spike von einzelnen natürlichen erhöhten Zählraten zu unterscheiden, wurde ein Spike wie folgt definiert:

- Im Untergrundbereich: Wenn in einem Höhenbin oder in aneinander grenzenden Bins eine Zählrate gemessen wurde, die mehr als eine Größenordnung über dem Untergrund liegt.
- Im Signalebereich: Hier sind die Zählraten deutlich höher als die des Untergrunds, so dass ein Spike schon ab der dreifachen Zählrate des normalen Signalverlaufs als Spike identifiziert würde.

Eine Übersicht über alle identifizierten Spikes ist in Anhang C.1 gegeben. In Abbildung 5.5 ist ein Beispiel für einen Spike im Untergrundbereich und ein Beispiel für einen Spike im Signalebereich gegeben. Die Lawinendiode zeigen beim

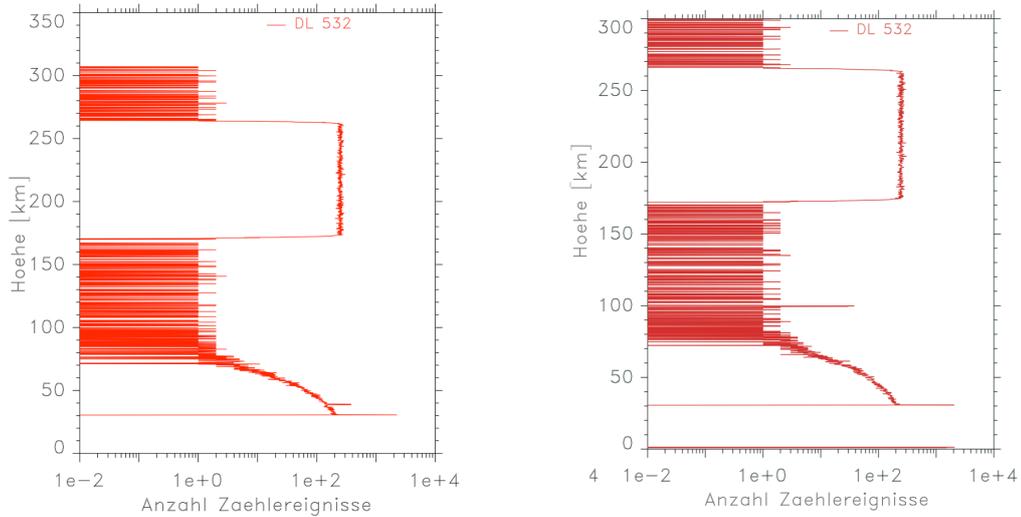


Abbildung 5.5: *links*: Ein Spike im LED-Signal bei 40 km Höhe im DL-Kanal. Dieser Spike trat bei einer Messung mit den Lawinenphotodioden am 9. August 05:28:54 UTC auf. *rechts*: Ein Spike im Untergrundbereich bei 100 km Höhe im DL-Kanal. Diese Spikes trat am 8. August 2006 20:23:20 UTC auf.

Öffnen des Gatings einen Einschaltimpuls, der auch in diesen Beispielen in einer Höhe von 31 km zu erkennen ist. Dieser Einschaltimpuls wird gezählt und führt zu einer höheren Zählrate (Spike). Er ist jedoch verstanden und wird für die weitere Analyse nicht betrachtet. Insgesamt wurden 11550 Records, wie in Abbildung 5.5, durchgesehen, was etwa 192 Messstunden entspricht. Davon entfallen 2884 Records (48 Messstunden) auf die Photovervielfacher und 8666 Records (144 Messstunden) auf die Lawinenphotodioden.

Die Ergebnisse für die Photovervielfacher und die Lawinenphotodioden sind in jeweils einem Histogramm in Abbildung 5.6 dargestellt. Die grünen Balken stehen für den DH- und die roten für den DL-Kanal. Auf der Abszisse ist der Höhenbereich aufgetragen und auf der Ordinate die Anzahl der Spikes pro Record. Spikes treten bei beiden Detektortypen auf. Bei den Photovervielfachern treten die Spikes eher gestreut auf, während sie bei den Lawinendioden breiter verteilt auftreten. Die Anzahl der Spikes bei den Photovervielfachern ist im DH-Kanal (10 Spikes) deutlich höher als im DL-Kanal (4 Spikes), während für die Lawinenphotodioden die Anzahl der Spikes im DL-Kanal höher ist (41 Spikes) als im DH-Kanal (18 Spikes). Da mit den Photovervielfachern jedoch wesentlich weniger Records analysiert und damit weniger Spikes beobachtet wurden, können keine exakten statistischen Aussagen gemacht werden. Da sowohl nach als auch vor dem Umbau Spikes auftreten, können die Detektoren als Ursache hierfür ausgeschlossen werden.

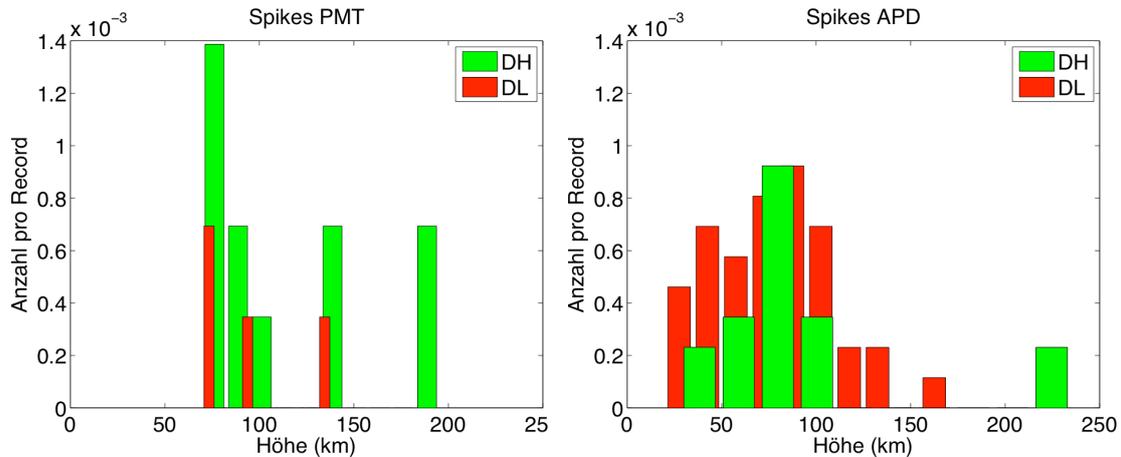


Abbildung 5.6: Übersicht aller identifizierten Spikes im Zeitraum 16. Mai bis 15. August. Mit den Photovervielfacherröhren (links) haben 48 Messstunden und mit den Lawinenphotodioden (rechts) 216 Messstunden stattgefunden.

5.1.2 Zähleffizienz

Eine höhere Zähleffizienz bei gleichem Signal und somit eine Verringerung des statistischen Zählfehlers ist das Ziel des Austausches der Photovervielfacher gegen die Lawinenphotodioden. In der Grafik in Abbildung 5.7 ist die maximale Zählrate jeder Messung aus dem Jahre 2006 mit einem Datenpunkt versehen. Das Signal wurde in einer Höhe von 30 km bestimmt und in Zählereignisse (counts) pro Laserschuss pro Höhenkilometer für den DH-Kanal über die Zeit aufgetragen. Der Balken entspricht dem maximalen Signal für einen Messzeitraum. Es ist dabei berücksichtigt worden, dass die Bedingungen in der Atmosphäre variieren. So kann an einigen Tagen die Transmission der Atmosphäre deutlich höher sein als an anderen Tagen, was zu einer Erhöhung des Signals führt. Aus diesem Grunde ist der Balken nicht auf das absolute Maximum gelegt worden. Bis Anfang April haben Nachtmessungen stattgefunden. Das maximale Signal liegt hierfür bei 75 cnts/shot/km. Zwischen Mai und Mitte September ist das Hintergrundlicht zu hoch, um mit dem Nachtsystem zu messen, weshalb hier das Tagsystem mit den zusätzlichen Etalons benutzt wird. Durch die Unterdrückung des unerwünschten Hintergrundlichtes wird allerdings auch das Nutzsinal abgeschwächt, was zu einer niedrigeren Zählrate bei Tageslichtmessungen im Vergleich zu Nachtmessungen führt. Der Austausch der Detektoren hat Ende Mai stattgefunden. Es ist zu erkennen, dass sich die Zähleffizienz nach dem Austausch für die Tageslichtmessungen sprunghaft erhöht hat. Während mit den Photovervielfachern die maximale Anzahl an Zählereignissen bei 20 cnts/shot/km liegt, werden mit den Lawinenphotodioden nach dem Umbau etwa 200 cnts/shot/km erreicht. Ab Mitte Oktober haben wieder Messungen mit dem Nachtsystem stattgefunden.

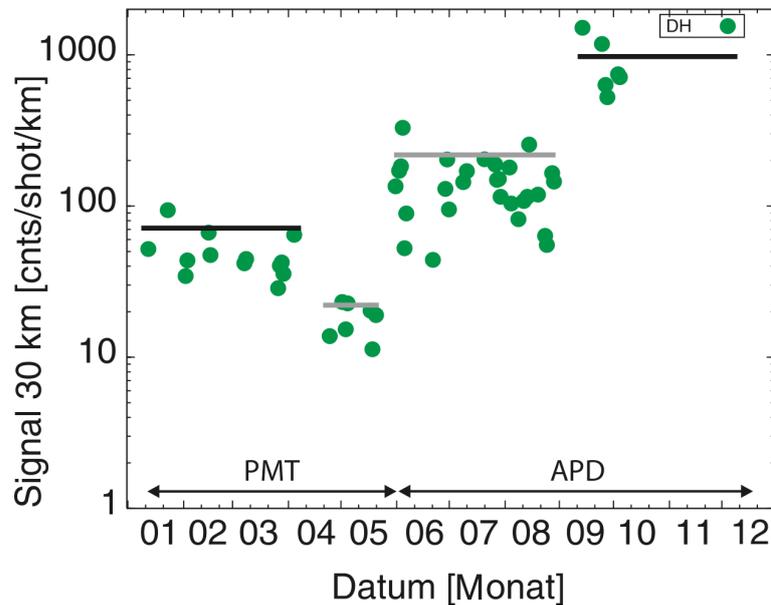


Abbildung 5.7: Nachweiseffizienz des DH-Kanals aus allen Atmosphärenmessungen von Januar bis Oktober [G. Baumgarten, *persönliche Mitteilung*, 2006]. Der Austausch der Detektoren erfolgte Ende Mai. Aufgetragen ist in grün die maximale Zählrate der jeweiligen Messung. Die Balken geben die maximale Zählrate für einen Zeitraum an, wobei mögliche Ausreißer berücksichtigt sind. Die dunklen Balken deuten Nachtmessungen ohne Etalon und die hellen Balken Tagmessungen mit Etalon an.

Hierbei wurden maximal 1000 cnts/shot/km gezählt. Dies liegt ebenfalls deutlich über der maximalen Anzahl an Zählereignissen, die vor dem Umbau der optischen Bank zwischen Januar und Mai wahrgenommen wurden und bei 70 cnts/shot/km liegen. Die Zähleffizienz hat sich durch den Einsatz der Lawinenphotodioden und den Umbau der optischen Bank also etwa um einen Faktor 10 erhöht.

5.1.3 Totzeitkorrektur und Linearität

Für die Windmessungen wird das Verhältnis der Signale zweier Detektoren benötigt. Kleine Abweichungen können dabei zu großen Ungenauigkeiten in der Auswertung führen. Deshalb ist es wichtig, Informationen über die Linearität der beiden Detektoren zueinander zu erhalten. Hierzu wird der Bereich betrachtet, in dem der Detektor das Atmosphärensignal bzw. LED-Signal nachweist. Sowohl das Atmosphären- als auch das LED-Signal weisen eine Dynamik von mehreren Größenordnungen auf. Das Signalverhältnis soll sowohl für kleine als auch große Zählraten konstant sein. Für die Windmessungen mit dem DoRIS-System

soll das Verhältnis der Detektoren DL und DH genutzt werden. Da während der Umgestaltung der optischen Bank sowohl der DH- als auch der DL-Detektor ausgetauscht wurden, soll für die folgende Betrachtung der Linearität der DM-Kanal als Referenzkanal genutzt werden. Der Strahlengang im DM-Kanal wurde während der Umgestaltung zwar optimiert, der Detektor wurde aber nicht ausgetauscht.

Totzeitkorrektur: Die Totzeit der Detektoren muss bei der Datenanalyse berücksichtigt werden. Das Eintreffen der Photonen auf den Detektor ist ein statistischer Poisson-Prozess. Deshalb muss durch eine Totzeitkorrektur berücksichtigt werden, wie viele Photonen bei einer bestimmten Zählrate statistisch nicht gezählt werden, weil sie zu kurz hintereinander auf den Detektor auftreffen und somit nicht voneinander getrennt werden können (siehe Abschnitt 2.5). In der Auswertesoftware wird als erstes die Totzeitkorrektur durchgeführt, bevor mit der eigentlichen Auswertung der Messergebnisse begonnen wird. Die Korrekturkurve der Totzeit wird durch eine Exponentialfunktion angenähert. Die Totzeit ist dabei ein Faktor im Exponenten dieser Korrekturfunktion. In der Auswertesoftware ist diese Korrektur durch die in *Hübner* [1998] beschriebene Methode implementiert. Diese Totzeitkorrektur ist an die Photovervielfacher angepasst und beträgt 7 ns. Für die Lawinenphotodioden besteht laut des Datenblattes der Hersteller eine Totzeit von 50 ns. Die Messungen mit den Lawinenphotodioden wurden mit der selben Totzeitkorrektur durchgeführt wie bei den Photovervielfachern, aber unter Verwendung der gegebenen Totzeit von $\tau_{dAPD} = 50$ ns. In der oberen Grafik von Abbildung 5.8 sind die Ergebnisse für eine Messung vom 8. Juni 2006 zu erkennen. Dem linken Bild sind die Zählraten der Kanäle DH, DM und DL mit Lawinenphotodioden zu entnehmen. In der mittleren Abbildung sind die Verhältnisse der Kanäle DH/DM und DL/DM und in der rechten Abbildung das Kanalverhältnis DL/DH dargestellt. Erwartet wird ein konstantes Kanalverhältnis. Es zeigt sich jedoch, dass das Signalverhältnis in allen drei Fällen nicht konstant ist. Der Grund hierfür ist eine fehlerhafte Totzeitkorrektur. Es wurden daraufhin verschiedene Werte für die Totzeit angenommen und die Kanalverhältnisse erneut gebildet. Dies ist in der unteren Grafik in Abbildung 5.8 zu sehen. Für die Werte $\tau_{dDH} = 12$ ns und $\tau_{dDL} = 16$ ns ist ein annähernd konstanter Verlauf der Kanalverhältnisse zu erkennen sowohl von DH und DL zu dem Referenzdetektor DM als auch von DL zu DH.

Die Zählraten, bei denen das RMR-Lidar betrieben wird, sind relativ niedrig. Sie liegen gewöhnlich bei unter 1 MHz, in seltenen Fällen bis 3 MHz, was der Minimierung von Totzeiteffekten dienen soll. Der hier genutzte Zählratenbereich wurde jedoch vom Hersteller der Lawinenphotodioden nicht ausreichend genau vermessen. Die Totzeitangabe des Herstellers bezieht sich auf Zählraten bis 15 MHz. Der Vergleich der hier ermittelten Totzeitkorrekturfaktoren von 14 bis 16 ns mit der wesentlich größeren Angabe des Herstellers (50 ns) führt zu dem Schluss, dass die Totzeitkorrektur mit einer einfachen Exponentialfunktion

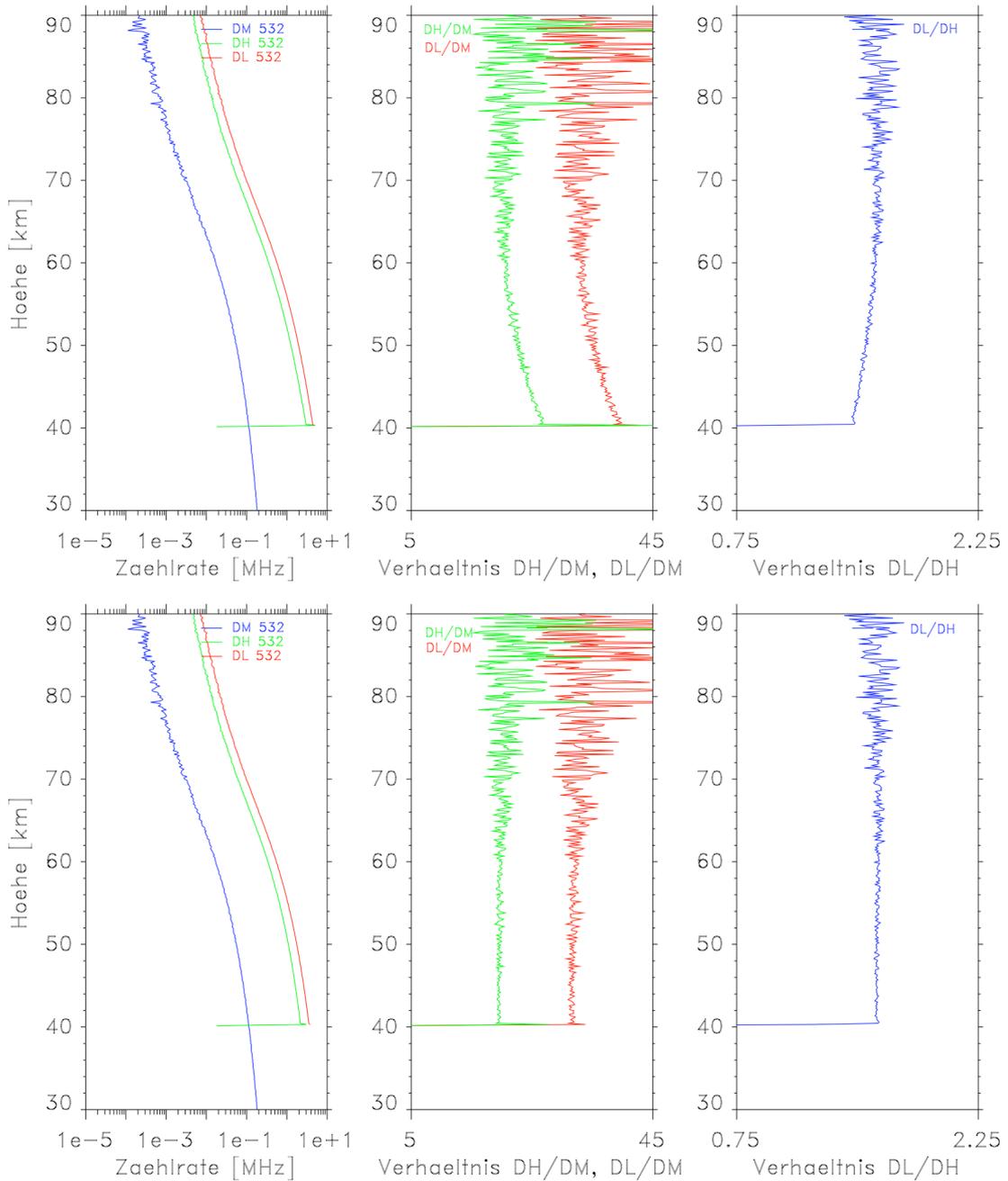


Abbildung 5.8: Einfluss der Totzeitkorrektur auf die Auswertung von Messungen mit Lawinenphotodioden. Links ist jeweils die korrigierten Zählrate der Kanäle DH, DL und DM für den Höhenbereich 40 km bis 100 km dargestellt. In der Mitte ist das Verhältnis der Kanäle DH/DM und DL/DM und rechts das Verhältnis DL/DH dargestellt. Die Totzeitkorrekturfaktoren sind für die Lawinenphotodioden (DH und DL) in der oberen Grafik mit $\tau_{dDH} = \tau_{dDL} = 50$ ns und in der unteren mit $\tau_{dDH} = 12$ ns und $\tau_{dDL} = 16$ ns gewählt. Der Totzeitkorrekturfaktor beträgt für den Photovervielfacher (DM) in beiden Fällen $\tau_{dDM} = 7$ ns. Die Messung hat am 8. Juni 2006 stattgefunden. Es wurden jeweils Daten aus einer Stunde Messzeit aufsummiert.

für den gesamten Dynamikbereich der Detektoren nicht ausreichend ist. Im Folgenden wurden die hier bestimmten Werte von $\tau_{dDH} = 12$ ns und $\tau_{dDL} = 16$ ns verwendet.

Außerdem wurde bei den Test- bzw. bei den Atmosphärenmessungen seit dem Austausch der Detektoren beobachtet, dass selbst bei maximalen Zählraten von 1 MHz über einen Zeitraum von nur 10 μ s die aktive Fläche des Detektors soweit erwärmt wird, dass die Dunkelzählrate ca. 600 μ s später noch ein Abklingverhalten mit einer Zeitkonstante von einigen ms zeigt. Diese Beobachtung geht jedoch über die Fragestellung dieser Arbeit hinaus und hat auf die hier abgeleiteten Ergebnisse keinen signifikanten Einfluss. In weiterführenden Arbeiten ist eine genaue Untersuchung geplant.

Linearität: Für die Bestimmung der Linearität wurde eine LED-Messung vor und nach dem Umbau durchgeführt. Vor dem Umbau fand die Messung mit den Photovervielfachern am 23. Mai 2006 06:33 bis 09:31 UTC statt. Nach dem Umbau wurde am 8. Juni 2006 14:53 bis 17:37 UTC eine Messung durchgeführt. Bis auf die Umgestaltung der optischen Bank sind alle weiteren Parameter unverändert geblieben. Um Informationen über die Linearität zu erhalten, wird das LED-Signal betrachtet. Dieses ist im Gegensatz zum Seedersignal dynamisch. Für den Höhenbereich, in dem das LED-Signal detektiert wird, wird das Verhältnis der Kanäle DH/DM sowie DL/DM gebildet. Für die Photovervielfacher ist dies in der oberen Grafik von Abbildung 5.9 und für die Lawinenphotodioden in der unteren Grafik von Abbildung 5.9 dargestellt. Zur Glättung der Signale wurde jeweils eine Stunde Messdaten aufsummiert. In der linken Abbildung ist jeweils das Signalprofil in dem betrachteten Höhenbereich der Kanäle DH, DL und DM dargestellt. In der mittleren Abbildung ist das Verhältnis von DH zu DM und in der rechten Abbildung das Verhältnis von DL zu DM für den selben Höhenbereich aufgetragen. Die Abszissen sind in den Verhältnis-Plots so skaliert, dass sie relativ zueinander gleich sind, was an der oberen Abszisse zu erkennen ist. Die Fehlerbalken, die sich aus dem statistischen Messfehler der Zählrate ergeben, sind für den jeweiligen Messpunkt grau dargestellt. Bei der Messung mit den Lawinenphotodiode wird das Gating aufgrund der höheren Empfindlichkeit des Detektors erst bei einer Höhe von 40 km geöffnet, während der Photovervielfacher so geschaltet ist, dass er ab einer Höhe von 30 km Photonen nachweist. Vergleicht man die Zählraten in der selben Höhe, ist für alle drei Kanäle eine um etwa eine Größenordnung höhere Zählrate bei der Messung nach der Umgestaltung zu erkennen, was auch für den Photovervielfacher im DM-Kanal gilt. Durch die höheren Zählraten ist die statistische Unsicherheit im Falle der Messung mit den Lawinenphotodioden geringer, weshalb die Kanalverhältnisse für die Lawinenphotodioden stabiler sind.

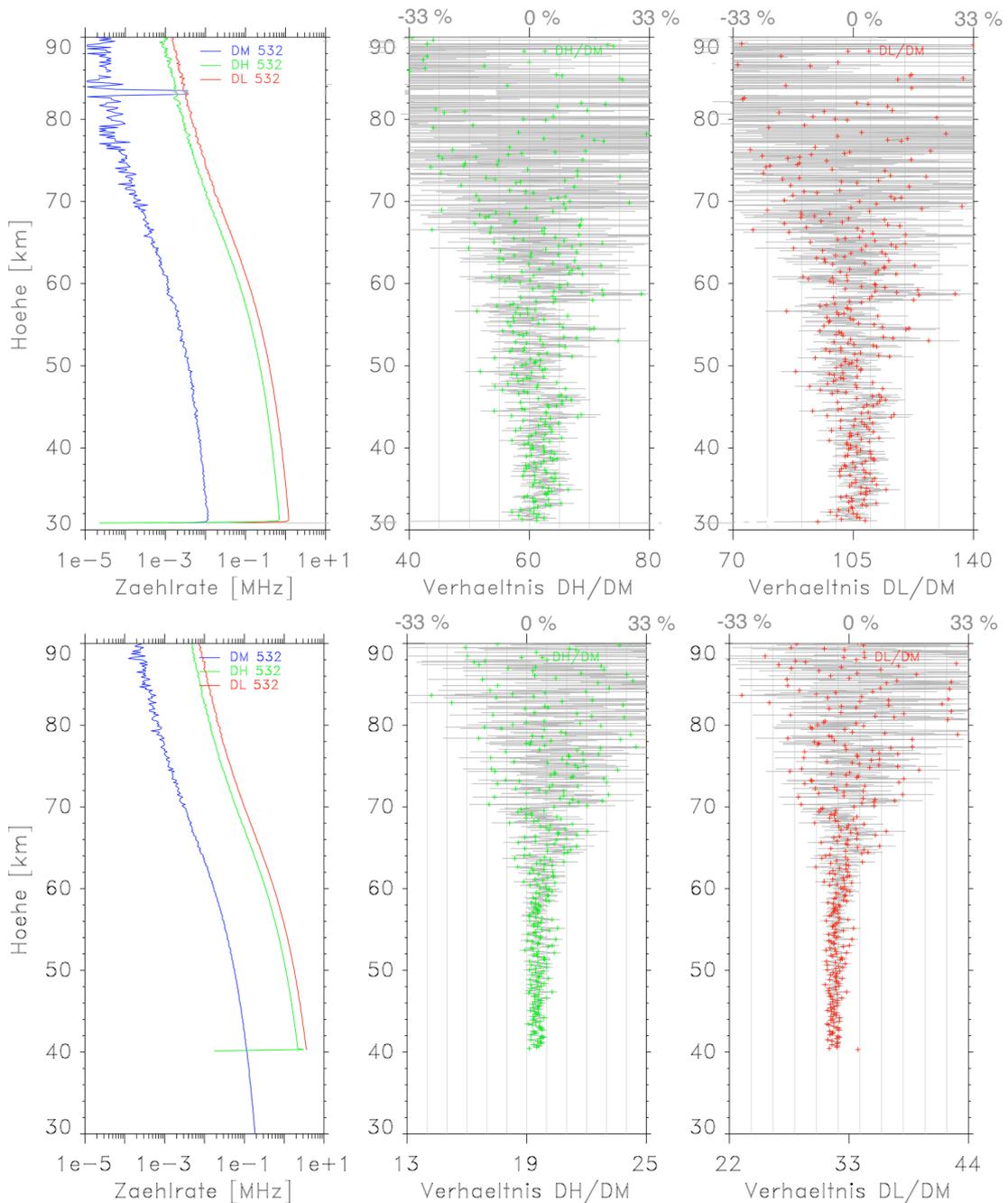


Abbildung 5.9: Linearität für die Konfiguration vor dem Umbau mit Photovervielfachern in den Kanälen DH und DL (oben) und für die Konfiguration nach dem Umbau mit den Lawinenphotodioden in den Kanälen DH und DL (unten). Links ist jeweils das Profil für das LED-Licht, in der Mitte das Verhältnis DH/DM und rechts das Verhältnis DL/DM für den selben Höhenbereich gegeben. Die Skalierungen der Abszissen der Verhältnisplots sind relativ zueinander gleich. Der Detektor DM, der während des Umbaus nicht ausgetauscht wurde, wird als Referenz genutzt. Die Messungen haben am 23. Mai 2006 und am 8. Juni 2006 stattgefunden. Es wurden jeweils Daten aus einer Stunde Messzeit aufsummiert. Im DM-Kanal ist bei den Photovervielfachern ein Spike in 84 km Höhe zu sehen.

5.1.4 Stabilität

Für die Windmessungen ist nicht nur die Linearität der Detektoren wichtig sondern auch deren langfristige Stabilität. Diese war für die bisherigen Messungen des Lidar nicht entscheidend, da z.B. für die Temperaturableitungen nur der Höhenverlauf des Signals von Bedeutung ist. Um die Stabilität der Detektoren zu untersuchen, werden das durch das kontinuierliche Licht des Seedlasers erzeugte Signal sowie das durch das LED-Licht hervorgerufene abklingende Signal betrachtet. Es werden jeweils die Zählraten aus dem entsprechenden Höhenbereich über der Zeit aufgetragen. Hierbei entspricht jeder Record einem Datenpunkt. Zusätzlich werden die Verhältnisse zweier Kanäle für die entsprechende Höhe gebildet und ebenfalls über der Zeit aufgetragen. Diese Kanalverhältnisse sollen über die Zeit konstant sein. In einem Record werden die Zählereignisse für 2000 Laserpulse aufsummiert. Für das LED-Licht wird pro Record die Anzahl der Zählereignisse über einen Höhenbereich von etwa 1 km aufsummiert. Im Detail entspricht dies einer Summation von 6 Höhenbins. Für die insgesamt gezählten Photonen wird die statistische Unsicherheit gemäß Gleichung D.2 berechnet. Anschließend wird der Wert des Zählereignisses auf ein Höhenbin und einen Laserschuss bezogen. Aufgrund der Zeitdauer eines Höhenbins von $1 \mu\text{s}$ entspricht ein gezähltes Photon pro Laserschuss und Höhenbin einer Zählrate von 1 MHz ($1 \text{ cnt/shot/bin} = 1 \text{ MHz}$). Das Licht des Seedlasers kann für den eingekoppelten Bereich als konstant angenommen werden. Zur Verringerung des statistischen Zählfehlers werden die Zählereignisse in dem Höhenbereich von 180 km bis 260 km (533 Höhenbins) aufsummiert, der statistische Zählfehler bestimmt und die erhaltenen Werte in MHz umgerechnet. Im Folgenden soll zur Vereinfachung das durch das Licht der LED verursachte Signal mit LED-Licht und das durch den Seedlaser erzeugte Signal mit Seederlicht bezeichnet werden. Da der komplette Nachweiszweig umgestaltet wurde und sich die Intensitäten der Lichtquellen über die Umbauphase hinweg geändert haben können, lassen sich die Zählraten der jeweiligen Kanäle vor und nach dem Umbau nicht direkt miteinander vergleichen. Die Stabilität der Detektoren lässt sich jedoch vergleichen, da die abgeleiteten Messfehler diese unterschiedlichen Signalstärken enthalten.

Zeitliche Entwicklung der Zählrate für das Seederlicht: In Abbildung 5.10 ist die Zählrate für den Seederbereich für die Kanäle DH (grün, oben), DL (rot, Mitte) für die Photovervielfacher aufgetragen. Die untere Grafik zeigt den Referenzphotovervielfacher im DM-Kanal (blau). In Abbildung 5.12 ist das gleiche für die Lawinenphotodioden geschehen. In jeder Grafik sind der Mittelwert und die Fehlerbalken des statistischen Zählfehlers für den entsprechenden Kanal aufgetragen. Mit gelber Farbe ist zusätzlich der Fehler der Zählrate an den Mittelwert angetragen. Für die Photovervielfacher beträgt die mittlere Zählrate im DH-Kanal 0,8459 MHz und im DL-Kanal 1,288 MHz. Der Referenzphotovervielfacher hat eine mittlere Zählrate von 0,0037 MHz. Die Ordinaten sind so skaliert,

dass sie relativ zu der jeweiligen mittleren Zählrate gleich sind. Aufgrund der deutlich kleineren Zählrate im DM-Kanal ist der relative statistische Fehler hier am größten. Es ist zu erkennen, dass der Signalverlauf variiert und nicht konstant ist. Dies tritt bei allen drei Detektoren gleichermaßen auf.

Ähnliches lässt sich auch für die Messung mit den Lawinenphotodioden beobachten. Hier liegt die mittlere Zählrate für den DH-Kanal bei 0,6059 MHz und für den DL-Kanal bei 0,8943 MHz. Der Referenzphotovervielfacher im DM-Kanal hat eine Zählrate von 0,0106 MHz. Das Signal variiert hier ebenfalls. Die Schwankungen liegen in allen drei Kanälen sowohl bei der Messung mit den Photovervielfachern als auch bei den Lawinenphotodioden bei maximal 11 % vom Mittelwert entfernt. Diese Schwankungen im Signal resultieren aus Schwankungen der Ausgangsintensität des Seedlasers bei 532 nm. Der Seedlaser ist zwar wellenlängenstabilisiert, seine Intensität variiert jedoch. In Abbildung 5.11 ist das Intensitätsprofil des Seedlasers für den betrachteten Messzeitraum am 23. Mai 2006 und in Abbildung 5.13 das entsprechende Intensitätsprofil für die Messung am 8. Juni gegeben. Die Ausgangsintensität des Seedlaserlichts, die direkt im Seedlaser gemessen wird, variiert in gleicher Weise wie die des detektierten Signals.

Zeitliche Entwicklung der Zählrate für das LED-Licht: Anders sieht der Signalverlauf dagegen für das LED-Licht aus. Die Zeitreihen hierfür sind im Anhang in Abbildung E.1 für die Photovervielfacher und in Abbildung E.2 für die Lawinenphotodioden dargestellt. Für die Photovervielfacher wurden die Zählerereignisse zwischen 33 km und 34 km Höhe gemittelt. Für die Lawinenphotodioden ist das gleiche zwischen 42 km und 43 km geschehen. Die Höhenbereiche sind so gewählt, dass das Signal möglichst hoch ist, aber nicht durch mögliche Einschalteteffekte der Detektoren beeinflusst wird. Die mittlere Zählrate für die Photovervielfacherröhren beträgt im DH-Kanal 0,5302 MHz, im DL-Kanal 0,91304 MHz und im DM-Kanal 0,0086 MHz. Für die Lawinenphotodioden betragen die mittleren Zählraten im DH-Kanal 1,5983 MHz, im DL-Kanal 2,5732 MHz und im DM-Kanal 0,0818 MHz. Die Ordinaten sind wieder so skaliert, dass sie relativ zueinander gleich sind. Nur für den DM-Kanal wurde aufgrund der geringeren Zählrate und der dadurch stärkeren Schwankungen eine größere Skalierung gewählt. Es fällt ein im Vergleich zum Seederlicht recht konstantes zeitliches Verhalten auf, wobei die Zählraten als Streuungen um den jeweiligen Mittelwert betrachtet werden können.

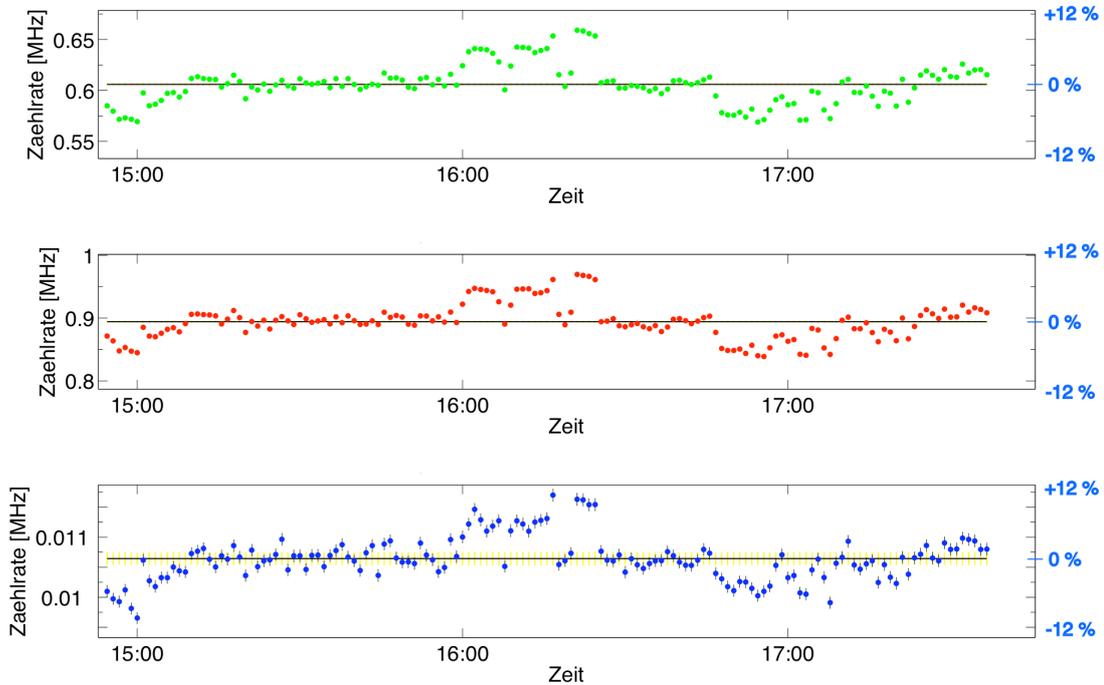


Abbildung 5.12: Zeitliche Entwicklung der Zählraten der Lawinendioden im DH-Kanal (oben), im DL-Kanal (Mitte) und des Referenzphotoervielfachers im DM-Kanal (unten) für Seederlicht. Die Skalierung der Achsen wurde auf gleiche Weise wie in Abbildung 5.11 durchgeführt. Die Messung hat am 8. Juni stattgefunden.

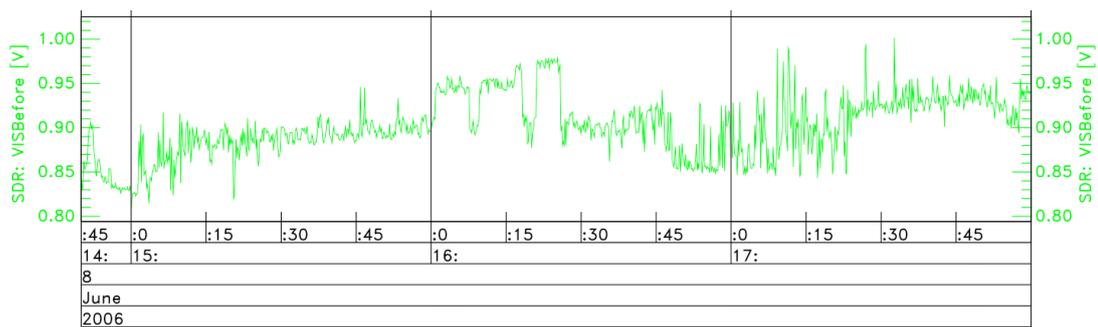


Abbildung 5.13: Die Intensität des Seedlasers in [V] während der Messung mit den Lawinenphotodioden am 8. Juni 2006

Zeitliche Entwicklung der Zählratenverhältnisse für das Seederlicht: Um die zeitliche Stabilität des Verhältnisses zweier Kanäle zueinander zu untersuchen, werden die Kanalverhältnisse DH/DM , DL/DM und DH/DL für das Seederlicht gebildet. Für die Photovervielfacher sind diese Kanalverhältnisse in Abbildung 5.14 und für die Lawinenphotodioden in Abbildung 5.15 gegeben.

Der oberste Plot stellt jeweils das Verhältnis DH zu dem Referenzdetektor DM , der mittlere Plot das Verhältnis DL zu DM und der untere Plot das Verhältnis DL zu DH dar. Die Ordinaten für die Plots DH/DM und DL/DM sind so skaliert, dass der Mittelwert der Zählrate in der Mitte der jeweiligen Ordinate liegt. Oberhalb und unterhalb davon sind 10 % des Mittelwertes aufgetragen. Für das Verhältnis DL/DH liegt der Mittelwert ebenfalls in der Mitte der Ordinate. Oberhalb und unterhalb davon sind aber ± 2 % des Mittelwertes aufgetragen. An den Mittelwert ist mit gelb der statistische Zählfehler angetragen. Bei den Photovervielfachern ist zu Beginn der Messung im Verhältnis DL/DH ein leichtes Ansteigen zu erkennen, während bei den Lawinenphotodioden ein leichter Abfall zu sehen ist. Dieser Abfall ist bei den Lawinenphotodioden ebenfalls bei der Verhältnisbildung DH/DM und DL/DM zu sehen.

In Abbildung 5.16 sind die Histogramme für die Verhältnisplots für die Photovervielfacherröhren (links) und die Lawinenphotodioden (rechts) zu sehen, die auf die jeweils mittlere Zählrate normiert sind. In den Histogrammen ist durch eine rote Linie die relative Standardabweichung und durch eine blaue Linie der relative statistische Zählfehler angedeutet. Das Verhältnis DL/DH , das für die Windmessungen genutzt werden soll, weist aufgrund der höheren Zählraten von DH und DL gegenüber DM , sowohl vor und nach dem Umbau die geringste Breite auf. In Tabelle 5.1 sind zusätzlich die relative Standardabweichung, der relative Zählfehler sowie das Verhältnis aus diesen beiden Größen für alle Kanalverhältnisse gegeben. An diesen Werten ist zu erkennen, dass für alle drei Kanalverhältnisse der Unterschied zwischen statistischem Zählfehler und Standardabweichung für das Kanalverhältnis DL/DH am geringsten ist. Die Lawinenphotodioden weisen für dieses Kanalverhältnis allerdings eine höhere relative Standardabweichung auf als die Photovervielfacherröhren. Die Ursache hierfür kann das Abfallen des Kanalverhältnisses zu Beginn der Messung sein. Auch für das LED-Licht ist bei den Lawinenphotodioden ein Abfallen des Kanalverhältnisses zu Beginn der Messungen zu beobachten. Dies wird in Anhang E.1.2 näher erläutert. Möglicherweise benötigen die Lawinenphotodioden eine gewisse Zeit bis sie stabil laufen. Dies sollte in nachfolgenden Arbeiten untersucht werden.

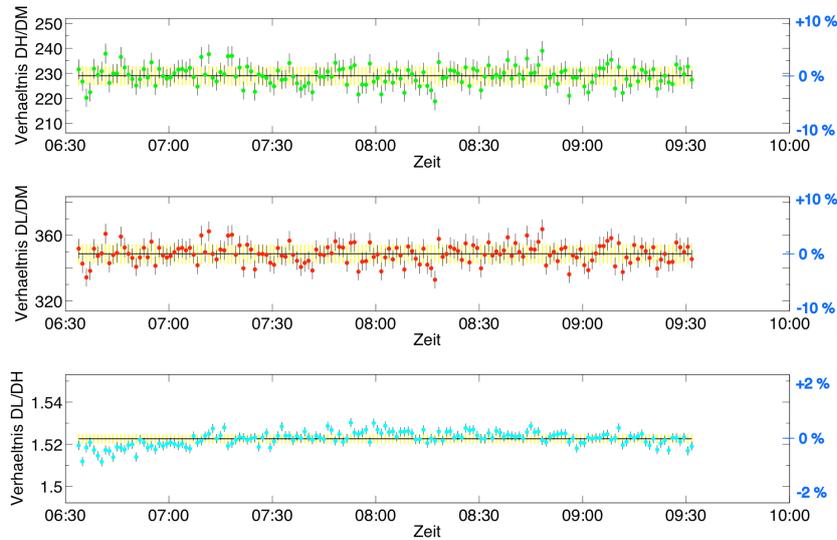


Abbildung 5.14: Zeitliche Entwicklung der Kanalverhältnisse DH/DM (oben), DL/DM (Mitte) und DL/DH (unten) für das Seederlicht für die Photovervielfacherröhren. Die linke Ordinate gibt das Kanalverhältnis an, die rechte die Verhältnisisänderung zum Mittelwert. Die Ordinaten sind so skaliert, dass sie relativ zueinander gleich sind. Die Messung hat am 23. Mai stattgefunden.

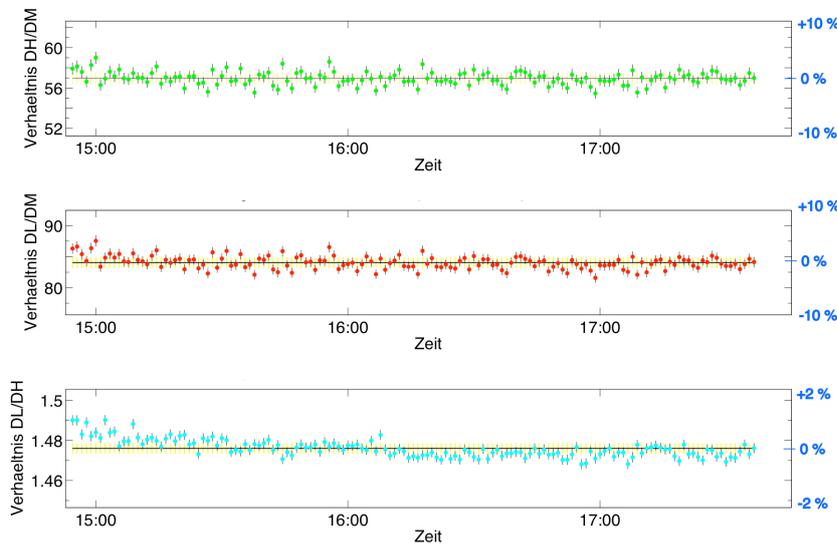


Abbildung 5.15: Zeitliche Entwicklung der Kanalverhältnisse DH/DM (oben), DL/DM (mitte) und DL/DH (unten) für das Seederlicht für die Lawinenphoto. Die Achsen wurden auf die gleiche Weise skaliert, wie in Abbildung 5.14 beschrieben. Die Messung hat am 8. Juni stattgefunden.

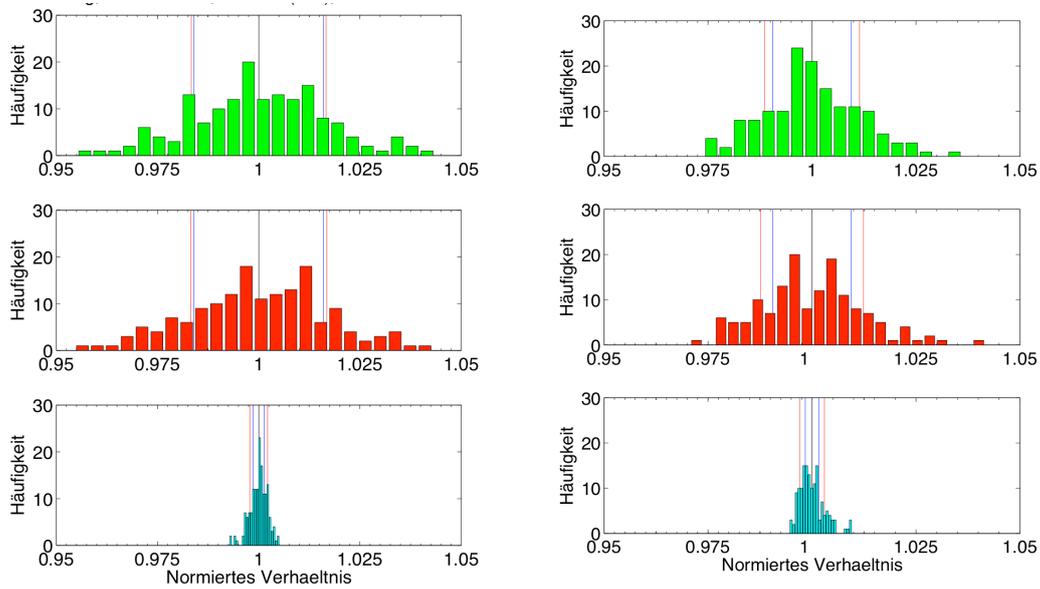


Abbildung 5.16: Fluktuation des Kanalverhältnisses um den Mittelwert dargestellt als Histogramm für DH/DM (oben), DL/DM (Mitte) und DL/DH (unten) für das Seederlicht für die Photovervielfacherröhren (links) und die Lawinenphotodioden (rechts). Die Messung haben am 23. Mai 2006 und am 8. Juni 2006 stattgefunden.

Tabelle 5.1: Relative Standardabweichung δZ , relativer Zählfehler ΔZ und das Verhältnis zwischen der relative Standardabweichung $\delta Z/\Delta Z$ und dem relativen Zählfehler für die Photovervielfacher (oben) und die Lawinenphotodioden (unten) für das Seederlicht

Photovervielfacherdioden	δZ	ΔZ	$\delta Z/\Delta Z$
DH/DM	0,0166	0,0160	1,04
DL/DM	0,0168	0,0160	1,05
DL/DH	0,0022	0,0014	1,57

Lawinenphotodioden	δZ	ΔZ	$\delta Z/\Delta Z$
DH/DM	0,0114	0,0095	1,20
DL/DM	0,0124	0,0094	1,32
DL/DH	0,0030	0,0016	1,88

5.2 Vergleich der Zählelektroniken

Die LICEL-Zählelektronik lief während aller Messungen im Zeitraum von Mai bis August parallel zu der herkömmlichen alten Elektronik in den Kanälen DH und DL mit. Eine genauere Beschreibung des Aufbaus ist in Abschnitt 3.5.2 zu finden.

5.2.1 Spikes

Mit der in Abschnitt 5.1.1 beschriebenen Methode wurden die mit der LICEL-Elektronik aufgezeichneten Signale auf Spikes hin untersucht. In den 11550 analysierten Records wurde lediglich ein Record mit Spikes identifiziert. Dieser Record ist in Abbildung 5.17 dargestellt. In dem identifizierten Record ist sowohl im DH-Kanal als auch im DL-Kanal bei etwa 138 km ein Spike zu sehen. In derselben Abbildung ist außerdem der zeitnah mit der alten Elektronik aufgezeichnete Datensatz dargestellt. Im DH-Kanal der alten Elektronik ist in exakt der gleichen Höhe wie bei der LICEL-Elektronik ein Spike zu erkennen. Es lässt sich daher vermuten, dass dieser Spike nicht durch die Zählelektronik entstanden ist. Die alte Elektronik weist in diesem Record einen weiteren Spike etwa 80 km auf. Insgesamt wurden für beide Elektroniken jeweils 11550 Records durchgesehen, was etwa 192 Messstunden entspricht. In der alten Elektronik sind dabei 72 Spikes aufgetreten, während bei der neuen Elektronik nur die zwei oben erwähnten gesichtet wurden. Die Spikes, die in der alten Elektronik aufgetreten sind, waren zudem meistens deutlich stärker als die hier gezeigten LICEL-Spikes. Der einzige Unterschied des Signalwegs zwischen der LICEL und der alten Elektronik sind die zusätzlichen Abschwächer vor der LICEL-Elektronik. Da diese aber passive Komponenten sind, kann davon ausgegangen werden, dass solche Spikes, sollten sie ihre Ursache vor der Zählelektronik haben, in der LICEL-Elektronik ebenfalls zu sehen sein sollten. Da dies nicht der Fall ist, liegt vermutlich die Ursache der Spikes in der alten Zählelektronik.

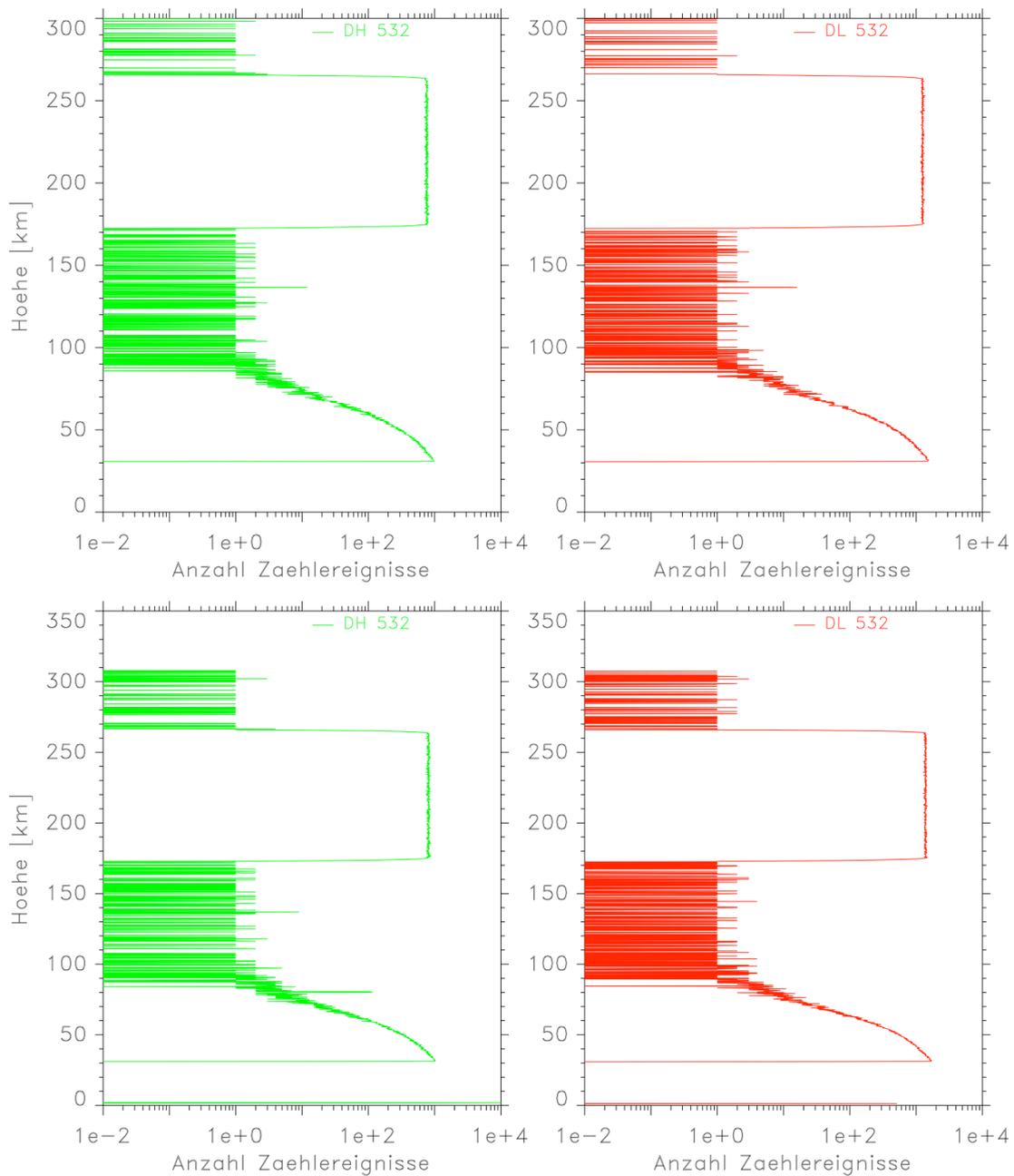


Abbildung 5.17: Einzige Spikes, die in LICEL-Records in 264 Messstunde aufgetreten sind. Die Spikes treten in einem einzigen Record auf (oben). Zeitgleich weist auch die alte Elektronik in gleicher Höhe im DH-Kanal einen Spike auf (unten). Zusätzlich weist die alte Elektronik einen weiteren Spike bei 80 km auf. Diese Spikes sind während der LED-Messung am 8. August 2006 um 8:01 UTC aufgetreten.

5.2.2 Zähleffizienz

Um die beiden Elektroniken vergleichen zu können, ist zwischen dem 7. und 9. August 2006 eine knapp 37-stündige Messung durchgeführt worden. Diese Messung hat mit den Lawinenphotodioden als Detektoren stattgefunden. Im Vergleich zu der Messung vom 8. Juni wurde vor dieser Messung der Seedlaser ausgetauscht. Die Messung hat mit dem Strahlteiler BS2 stattgefunden. Da das Seedersignal den DH-Kanal übersteuerte, wurde ein zusätzlicher 19% -Abschwächer (ND) vor den DH-Kanal gestellt. Der Aufbau ist im Anhang in Abbildung E.5 gegeben. Der für diese Messung entscheidende Teil ist grün hinterlegt.

Die Signale sind genauso wie bei der Stabilitätsbetrachtung der Detektoren in Abschnitt 5.1.4 im Seederbereich zwischen 180 km bis 260 km gemittelt. Das LED-Signal wurde für einen Höhenbereich von 33 km bis 34 km gemittelt. Der Höhenbereich wurde ebenfalls wie in Abschnitt 5.1.4 so gewählt, dass das Signal möglichst hoch ist und gleichzeitig wenig durch mögliche Einschalt Effekte der Detektoren beeinflusst wird. Es wurde die vom Hersteller angegebene Totzeit von 50 ns für beide Lawinenphotodioden gewählt. Es konnten keine so signifikanten Unterschiede im Verhältnisprofil für unterschiedliche Totzeiten, wie in Abschnitt 5.1.3 beobachtet, erkannt werden. Die zeitliche Entwicklung des Signal für einen bestimmten Höhenbereich zeigt zudem im Vergleich zur Betrachtung des Signalverlaufs über ein Höhenprofil nur eine sehr vernachlässigbare Dynamik, wodurch die Totzeit hierbei eine nur untergeordnete Rolle spielt. Des Weiteren haben die Totzeitkorrektur oder mögliche Einschalt Effekte bei dem Vergleich der Elektroniken keine Auswirkung auf die Untersuchungen der Zähleigenschaften der Elektroniken, da diese Effekte von beiden Elektroniken gleichermaßen wahrgenommen werden sollten.

Zeitliche Entwicklung der Zählrate für das Seederlicht: In Abbildung 5.18 ist oben der Signalverlauf für das Seederlicht für den Kanal DH für die herkömmliche und unten für die LICEL-Elektronik zu sehen. Das gleiche ist im Anhang in Abbildung E.6 für den DL-Kanal zu dargestellt. Da diese Messung mit dem Strahlteiler BS2, der das Licht im Verhältnis 50:1 teilt, durchgeführt wurde, weist das Signal im DH-Kanal eine höhere Zählrate und damit einen kleineren relativen statistischen Fehler auf als das des DL-Kanals. Wie schon bei der Untersuchung der Stabilität der Detektoren in Abschnitt 5.1.4 beschrieben, ist auch bei dieser Messung eine Variation des Seedersignals zu erkennen. Mit rot ist ein gleitendes Mittel über 30 Messpunkte in die Kurve gedruckt. Die Signalschwankungen werden in gleicher Weise von der alten als auch von der LICEL-Elektronik in beiden Kanälen wahrgenommen. Sie haben ihre Ursache also nicht in der Elektronik. Die Intensität des Seedlasers ist in Abbildung 5.19 gegeben. Sowohl die Ausgangsintensität des Seedlasers als auch die Zählrate steigen im Messzeitraum an. Beim Seeder beträgt der Anstieg nur 1,5 %, wohingegen die aber Zählrate um 4 % ansteigt.

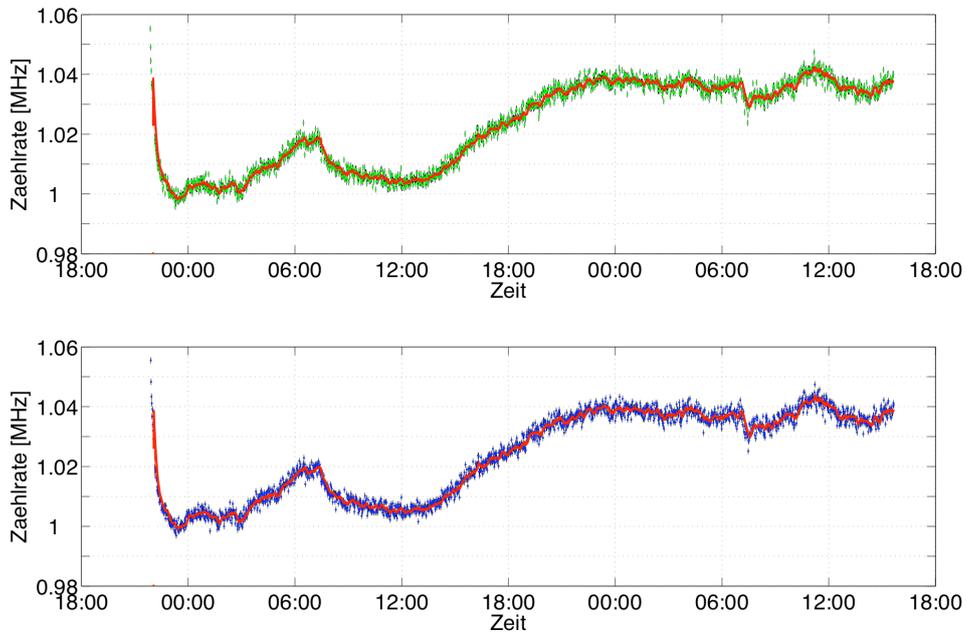


Abbildung 5.18: Zeitliche Entwicklung der Zählrate für das Seederlicht für den DH-Kanal für die alte Elektronik (oben) und die LICEL-Elektronik (unten). Die Messung hat vom 7. bis 9. August 2006 stattgefunden.

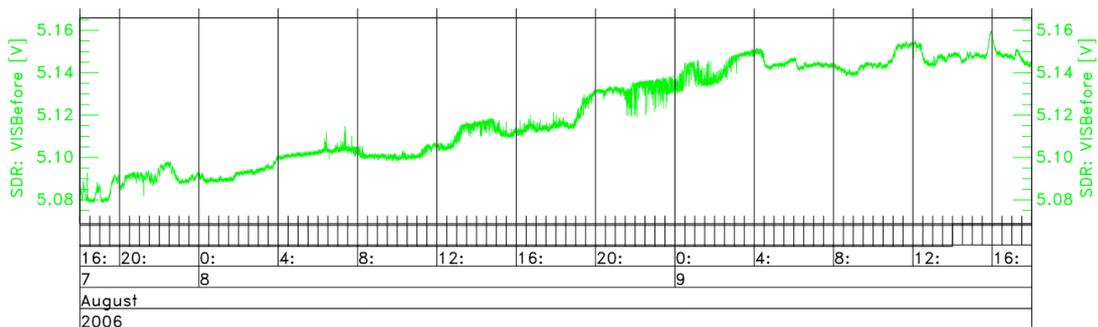


Abbildung 5.19: Die Ausgangsintensität des Seedlasers bei 532 nm in [V] während der Messung vom 7. bis 9. August 2006.

Zeitliche Entwicklung der Zählrate für das LED-Licht: Aufgrund weniger Zählereignisse, weist das LED-Licht einen höheren statistischen Fehler auf als das Seederlicht. Die Schwankungen können als Schwankungen um den Mittelwert angesehen werden. Anders als beim Seederlicht ist kein Trend auszumachen. Dies ist in Abbildung E.7 für den DH-Kanal in Abbildung E.8 für den DL-Kanal gegeben. Oben ist jeweils der zeitliche Signalverlauf für die alte und unten für die neue Elektronik gegeben.

Der Vergleich der beiden Elektroniken untereinander zeigt keine großen Unterschiede. Die Zählraten wie auch der Verlauf der Zeitreihen sind ähnlich. In Tabelle 5.2 sind alle Zählereignisse, die von den Elektroniken registriert wurden, über den betrachteten Höhenbereich für die gesamte Messung aufsummiert. Die alte Elektronik registriert sowohl für das Seeder- als auch das LED-Licht in beiden Kanälen mehr Ereignisse. Der Unterschied ist maximal 1,13 %. Die Abweichungen können am unterschiedlichen Zählverhalten oder aber auch am Ausleseverhalten der Elektroniken liegen. Da die Lawinenphotodiodenmodule einheitliche Pulshöhen liefern, kann dies nicht an unterschiedlich gesetzten Diskriminatorschwellen liegen. Die LICEL-Software kann im Gegensatz zu der alten Elektronik nicht simultan zur Datenübertragung Ereignisse zählen. Während dieser Messung hat die LICEL-Elektronik 2242 Records insgesamt 14 Records weniger aufgezeichnet als die alte Elektronik, die 2256 Records aufweist. Dies führt zu einem Verlust an Zählereignissen in der beobachteten Größenordnung.

Tabelle 5.2: Absolute Anzahl der Zählereignisse für die alte und die LICEL-Elektronik.

	Kanal	absolut Anzahl der Zählereignisse		abweichende Zählrate in % (Alte-LICEL)/Alte
		Alte	LICEL	
Seederlicht	DH	$2,4596 \cdot 10^9$	$2,4467 \cdot 10^9$	0,525
	DL	$2,9791 \cdot 10^8$	$2,9617 \cdot 10^8$	0,584
LED-Licht	DH	$1,2708 \cdot 10^7$	$1,2565 \cdot 10^7$	1,13
	DL	$2,5023 \cdot 10^6$	$2,4765 \cdot 10^6$	1,04

5.2.3 Linearität

Um Aussagen über die Linearität der beiden Elektroniken zu treffen, wird wie in Abschnitt 5.1.3 für die Detektoren, das Verhältnis DL/DH für den Bereich des LED-Lichts gebildet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.20 gegeben. Mit grau

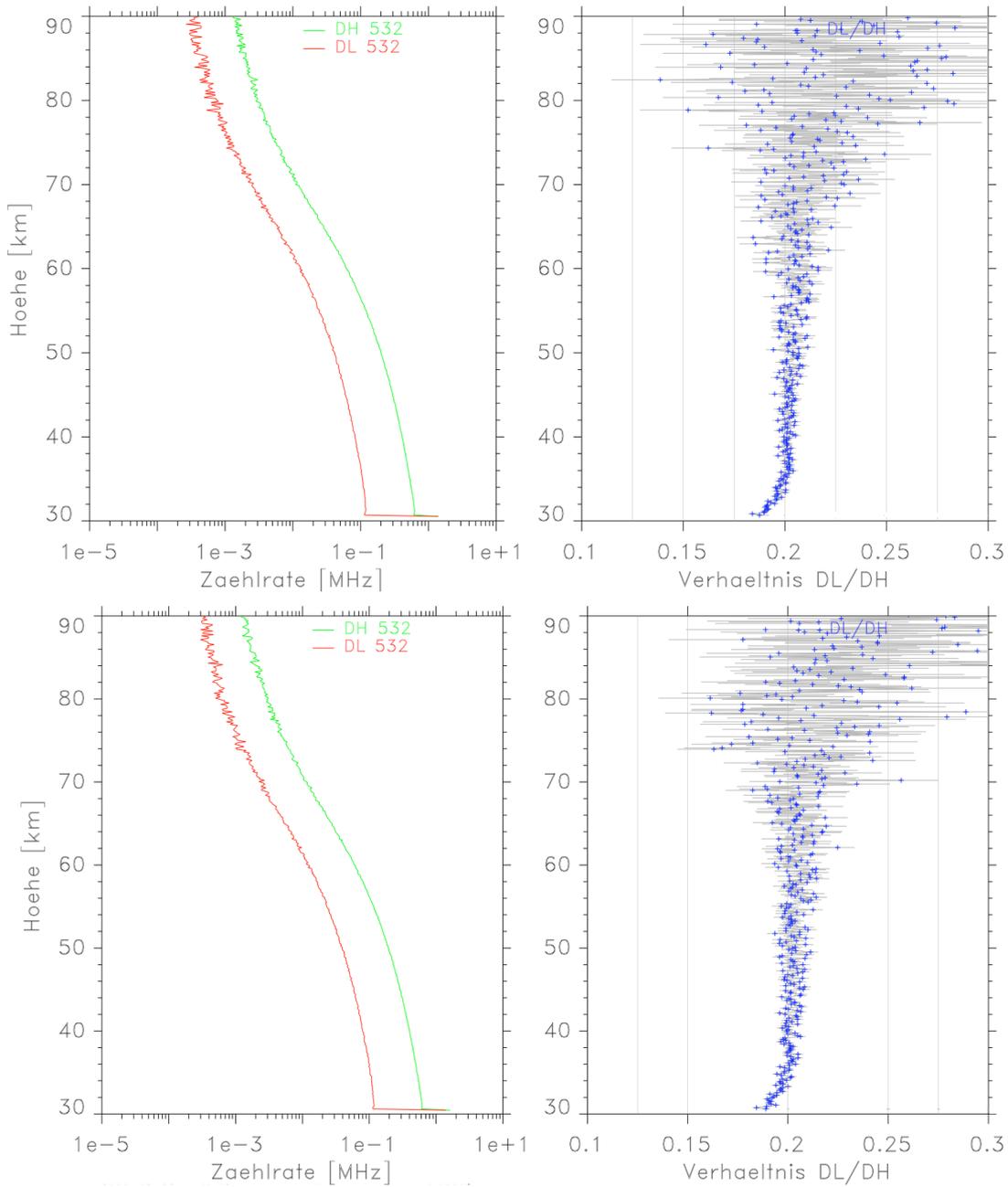


Abbildung 5.20: Die Linearität für die alte Elektronik und die LICEL-Elektronik für die Kanäle DH und DL. Das Rückstreuprofil für diese beiden Kanäle (links) und das Kanalverhältnis DL/DH (rechts) über die Höhe für die alte Elektronik (oben) und die LICEL-Elektronik (unten). Die Integrationszeit für diese Messdaten vom 8. August 2006 beträgt eine Stunde.

sind die Fehlerbalken aufgetragen. Es ist sowohl für die LICEL-Elektronik als auch für die alte Elektronik ein nichtlinearer Verlauf nach dem Einschalten bis zu einer Höhe von etwa 33 km zu sehen. Darüber ist ein konstantes Signalverhältnis zu erkennen. Zwischen den Elektroniken ist dabei kein bemerkenswerter Unterschied auszumachen. Der nichtlineare Verlauf in den unteren Höhen resultiert vermutlich aus dem Einschaltversprechen der Detektoren und der niedrigen Zählrate im DL-Kanal. In dem Signal des DL-Kanals ist nach dem Einschaltimpuls eine leichte Zunahme der Zählrate zu erkennen, bevor das Signal den typischen abklingenden Verlauf des LED-Lichts zeigt. Dies führt vermutlich zu der beobachteten Nichtlinearität.

5.2.4 Stabilität

Für die Stabilitätsbetrachtung wird, wie bei den Detektoren in Abschnitt 5.1.4 das Verhältnis der Kanäle DH zu DL über die Zeit analysiert.

Zeitliche Entwicklung des Zählratenverhältnisses für das Seederlicht: In Abbildung 5.21 ist das Kanalverhältnis sowohl für die alte als auch für die neue Elektronik für das Seederlicht dargestellt. Die rote Kurve ist das über 30 Messwerte gleitende Mittel. Es ist zu erkennen, dass das Teilungsverhältnis der Kanäle über die Zeit variiert. Dies wird von beiden Elektroniken gleichermaßen beobachtet. In Abbildung 5.22 sind die Histogramme der Verhältnisse DL/DH für die alte und für die LICEL-Elektronik gezeigt. In Tabelle 5.3 sind die dazugehörigen Werte für die relative Standardabweichung, den relativen Fehler der Zählrate und das Verhältnis aus der Standardabweichung und dem Zählfehler gegeben. Der Vergleich der Standardabweichungen zeigt zwischen den Elektroniken keinen Unterschied. Die relative Standardabweichung beträgt sowohl für die alte als auch für die LICEL-Elektronik 0,0061. Die Standardabweichung ist für beide Elektroniken 2,10 mal größer als der statistische Fehler der Einzelmessungen. Die Elektroniken weisen damit in etwa gleiches Zählverhalten auf. Da die Standardabweichung jedoch um einen Faktor 2 größer ist, als der statistische Fehler der Einzelmessungen, wird der Fehler des Kanalverhältnisses hier nicht durch den statistischen Zählfehler bestimmt sondern durch den Trend, den das Signal aufweist.

Tabelle 5.3: Relative Standardabweichung δZ , relativer Zählfehler ΔZ und das Verhältnis zwischen der relative Standardabweichung und dem relativen Zählfehler $\delta Z/\Delta Z$ für die alte und die LICEL-Elektronik für das Seederlicht.

	δZ	ΔZ	$\delta Z/\Delta Z$
alte	0,0061	0,0029	2,10
LICEL	0,0061	0,0029	2,10

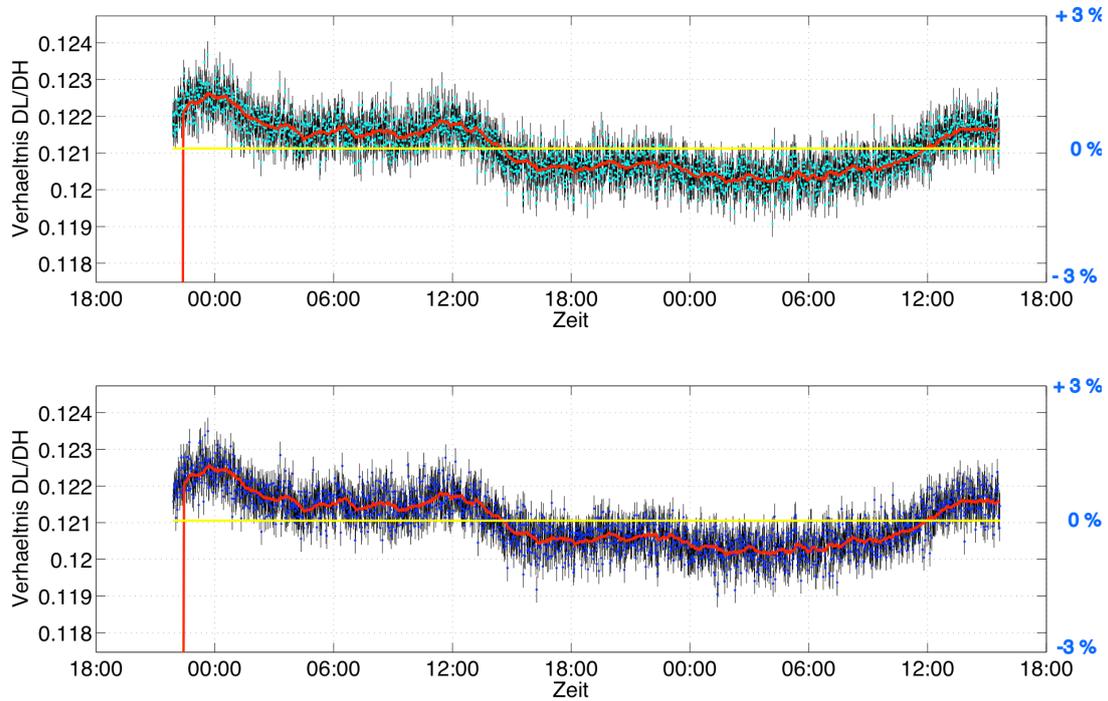


Abbildung 5.21: Zeitliche Entwicklung des Kanalverhältnisses DL/DH für das Seedlaserlicht für die alte Elektronik (oben) und die LICEL-Elektronik (unten). Die Messung hat vom 7. bis 9. August 2006 stattgefunden.

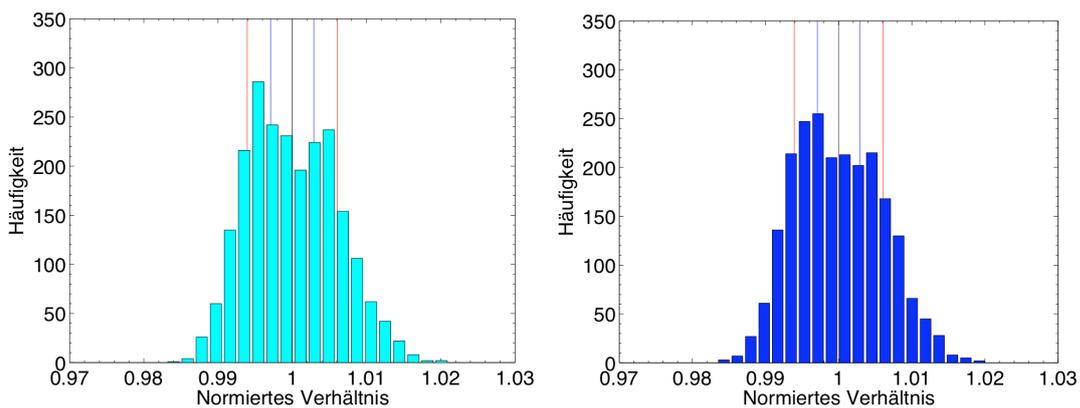


Abbildung 5.22: Fluktuation des Kanalverhältnisses um den Mittelwert dargestellt als Histogramm für DL/DH für die alte Elektronik (links) und die LICEL-Elektronik (rechts) für das Seederlicht. Die Messung hat am vom 7. bis 9. August stattgefunden.

Zeitliche Entwicklung des Zählratenverhältnisses für das LED-Licht In Abbildung 5.23 ist der zeitliche Verlauf des Kanalverhältnisses DL/DH sowohl für die alte Elektronik als auch für die LICEL-Elektronik für das LED-Licht zu sehen. Aufgrund der geringeren Zählereignisse, die für diese Betrachtung im Vergleich zum Seedlaserlicht aufsummiert wurden, ist der statistische Fehler hier höher als bei der Betrachtung des Seederlichts. Es sind deshalb nur die Kurven des über 30 Messwerte gleitenden Mittels sowie die der Mittelwertes gezeigt. Die Achsenskalierung ist genauso wie für die zeitliche Entwicklung des Kanalverhältnisses für das Seederlicht gewählt. Das Kanalverhältnis zeigt ein Schwanken um den Mittelwert. Ein Trend ist anders als beim Seederlicht nicht zu erkennen. Aufgrund des relativ großen statistischen Fehlers können hier jedoch keine Aussagen über den exakten Kurvenverlauf gemacht werden. Die Elektroniken nehmen diese Schwankungen ähnlich war. In Tabelle 5.4 sind die entsprechenden Werte für die relative Standardabweichung, den relativen statistischen Zählfehler und das Verhältnis aus der Standardabweichung und dem Zählfehler gegeben.

Die relative Standardabweichung für die LICEL-Elektronik ist 0,91 mal kleineren Wert auf als ihr relativer Zählfehler. Dies bedeutet, dass der Fehler hier ausschließlich durch den statistischen Zählfehler bestimmt wird und nicht durch die Elektronik. Für die alte Elektronik ist die relative Standardabweichung um das 1,03-fache größer als der relative statistische Zählfehler. Die relative Standardabweichung für die alte Elektronik beträgt 0,0338, für die LICEL-Elektronik ist sie mit 0,0301 geringer.

Tabelle 5.4: Relative Standardabweichung δZ , relativer Zählfehler ΔZ und das Verhältnis zwischen der relative Standardabweichung und dem relativen Zählfehler $\delta Z/\Delta Z$ für die alte und die LICEL-Elektronik für das LED-Licht

	δZ	ΔZ	$\delta Z/\Delta Z$
alte	0,0338	0,0328	1,03
LICEL	0,0301	0,0329	0,91

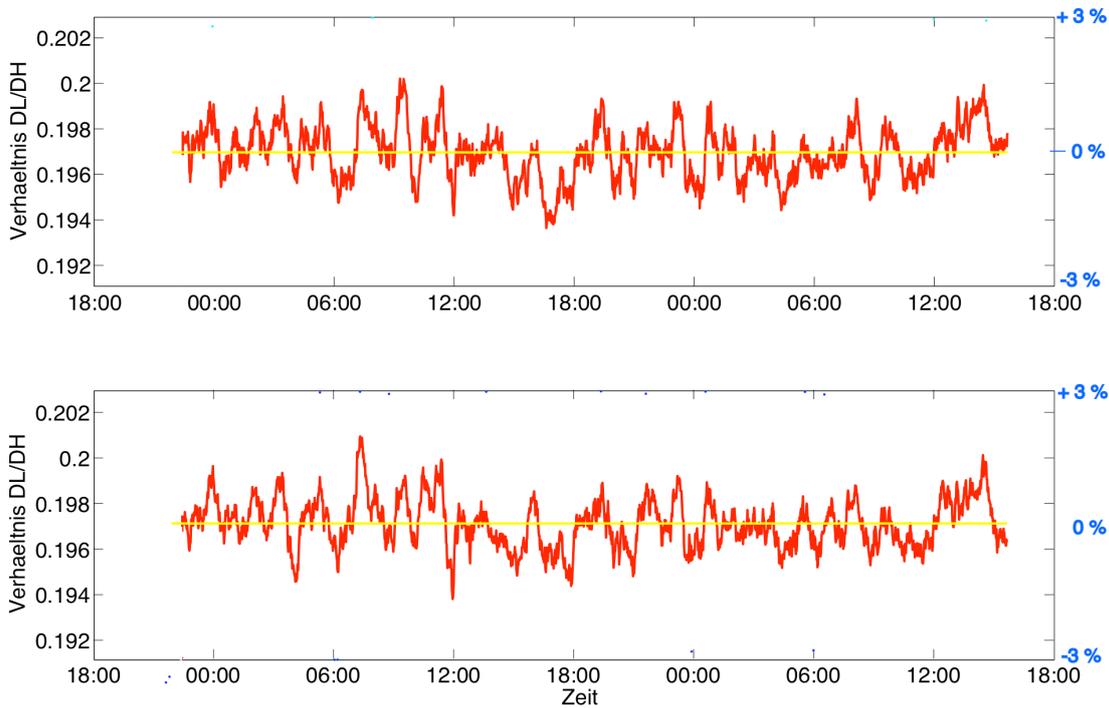


Abbildung 5.23: Zeitliche Entwicklung des Kanalverhältnisses DL/DH für die alte Elektronik (oben) und die LICEL-Elektronik (unten) für das LED-Licht. Die Messung hat vom 7. bis 9. August stattgefunden.

5.3 Sonstige Beobachtungen

Über die eigentlich Fragestellung hinaus wurde bei der Untersuchung festgestellt, dass die Eigenschaften der optischen Bank noch genauer untersucht werden sollten. Trotz Umbau der optischen Bank zur Optimierung der Kanaltrennung durch BS2.I2 wurde beobachtet, dass die Aufteilung von LED- und Seederlicht weiterhin unterschiedlich ist (siehe Abbildung 5.4). Während der 37-stündigen Messung wurde beobachtet, dass die Aufteilung des Seederlichts sich innerhalb von 24 Stunden systematisch um 2 % ändert. Die Aufteilung des LED-Lichts kann dagegen als eine Schwankung um den Mittelwert angesehen werden (siehe Abschnitt 5.2.4). Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die statistische Sicherheit bei der LED-Messung aufgrund der geringeren Anzahl nachgewiesener Photonen deutlich kleiner ist. Während der in Abschnitt 5.2.4 diskutierten 37-stündige Messung kommt der Strahlteiler BS2, der eine polarisationsunabhängige Strahlteilung nicht gewährleistet, als mögliche Ursache für die variierende Strahlteilung in Betracht. Allerdings wurde dieser Effekt auch bei Messungen mit dem Strahlteiler BS2.I2, der das Licht unabhängig von dessen Polarisation aufteilen soll,

beobachtet. Dies wird durch die in Abschnitt 5.1 durchgeführte Bildung der Kanalverhältnisse zwischen DH und DL nach dem Umtausch bestärkt. Hier zeigt das Kanalverhältnis trotz des Strahlteilers BS2.I2 auch nach dem Umbau für das Seederlicht einen anderen Wert als für das LED-Licht. Der Strahlteiler BS2 kann also nicht die alleinige Ursache für diesen Effekt sein. Die Ursache für die systematischen Änderungen der Aufteilung des Seederlichts stellen vermutlich optische Komponenten dar. Das Licht des Seedlasers ist kohärent und polarisiert, während das Licht der LED, ähnlich wie das aus der Atmosphäre zurückgestreute Licht, nahezu unpolarisiert und unkohärent ist. Möglicherweise sind kleinste Änderungen der Temperatur oder die Ausdehnung von einzelnen Komponenten ausreichend, um das Teilungsverhältnis des Lichts zu verändern. Um das Licht des Seedlasers als Referenz für Windmessungen nehmen zu können, muss die Ursache gefunden und behoben werden. Eventuell ist es ausreichend das Licht des Seedlasers zu depolarisieren.

5.4 Schlussfolgerung

Detektorumbau: Die Tests haben gezeigt, dass durch den Wechsel der Detektoren keine Nachteile in Hinsicht auf Stabilität und Linearität entstehen. Die Totzeit wurde vom Hersteller mit 50 ns spezifiziert. Die Untersuchungen in Abschnitt 5.1.3 haben dagegen gezeigt, dass im typischen Zählratenbereich bei Lidarmessungen (bis ca. 1 MHz) nur eine Totzeit von 12 ns bis 16 ns auftritt. Diese Werte sind damit nicht wesentlich größer als der einer Photovervielfacherröhre mit 7 ns.

Elektroniktest: Die LICEL-Elektronik weist in Hinsicht auf die Stabilität und Linearität ein analoges Verhalten wie die alte Elektronik auf. Darüber hinaus zeigt sie mit 2 Spikes wesentlich weniger Spikes als die alte Elektronik, die im selben Zeitraum 72 Spikes registrierte. Die verwendete LICEL-Elektronik zählt zwischen 0,5 % und 1,13 % weniger Photonen als die vorhandene Elektronik. Eine Verbesserung ist durch Modifikation der LICEL-Elektronik möglich. Positiv zu bemerken ist, dass durch den Umbau der optischen Bank und den Austausch der Detektoren ein Zählratenanstieg um etwa einen Faktor 10 erreicht wurde, obwohl die aktive Fläche des Detektors mit einem Durchmesser von ca. 200 μm wesentlich kleiner ist als bei einer Photovervielfacherröhre.

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

Für Windmessungen ist eine hohe Genauigkeit und Stabilität des Systems ein wichtiger Faktor. Hierzu wurde im Rahmen dieser Arbeit die Datenerfassung überprüft und teilweise erneuert. So wurden die Detektoren in den für Windmessungen genutzten Kanälen ausgetauscht und die optische Bank umgestaltet. Dabei wurden die Photovervielfacherröhren gegen Lawinenphotodioden ersetzt. Die Lawinenphotodioden zeigen im Vergleich zu den Photovervielfacherröhren analoge Eigenschaften in Bezug auf die Linearität. Die zeitliche Entwicklung des Zählratenverhältnisses zeigt bei den Lawinenphotodioden einen abfallenden Trend nach dem Einschalten der Detektoren, dessen Ursache nicht bekannt ist. Zudem wurde die Totzeit für die Lawinenphotodioden bestimmt. Sie ist kleiner als die vom Hersteller angegebene und mit 12 - 16 ns vergleichbar zu der Totzeit der Photovervielfacherdioden von 7 ns. Die Zähleffizienz ist seit der Umgestaltung der optischen Bank um das 10-fache gestiegen.

In zwei Kanälen ist die neue LICEL-Zählelektronik im Vergleich zu der vorhandenen alten Elektronik untersucht wurden. Die Elektroniken weisen ein ähnliches Zählverhalten auf. Die LICEL-Elektronik zählt zwischen 0,5 % und 1,13 % weniger Ereignisse als die alte Elektronik, was vermutlich durch die interne Datenverarbeitung der LICEL-Elektronik verursacht wird. In der Linearität und Stabilität der beiden Elektroniken wurde keine signifikanten Unterschiede festgestellt. Die LICEL-Elektronik zeigt jedoch erfreulicherweise wesentlich weniger Spikes.

6.2 Ausblick

Die Eigenschaften der Lawinenphotodioden sollten weiter untersucht werden. So ist noch nicht geklärt, weshalb das Zählratenverhältnis zu Beginn der Messungen einen abfallenden Trend zeigt. Die Totzeitkorrektur für die nicht in dieser Arbeit untersuchten Lawinenphotodioden sollte überprüft werden. Für diese wird zur Zeit die vom Hersteller angegebene Totzeit von 50 ns benutzt. Die in dieser Arbeit entwickelten Tests sollen nach Einbau der neuen Elektronik zeitgleich mit der vorhandenen LICEL-Elektronik wiederholt werden. Dazu kann LED-Testaufbau benutzt werden.

A LED-Testmessungen

Tabelle A.1: Tabellarischer Überblick über alle LED-Testmessungen, die während dieser Arbeit stattgefunden haben.

Datum	Start	Stopp	Kanal	Bemerkungen
16.05.2006	11:17 Uhr	11:26 Uhr	DH,DL,DM	neue Shuttertrigger
	11:44 Uhr	11:47 Uhr	DH,DL,DM	
	11:51 Uhr	12:41 Uhr	DH,DL,DM	
18.05.2006	7:32 Uhr	12:52 Uhr	DH,DL,DM	Polarisator 0
22.05.2006	9:17 Uhr	12:52 Uhr	DH,DL,DM	Polarisator 90
23.05.2006	6:33 Uhr	9:31 Uhr	DH,DL,DM	Polarisator 45
	9:41 Uhr	13:04 Uhr	DH,DL,DM	
27.05.2006	18:23 Uhr	20:17 Uhr	DH,DL,DM	Polarisator 90
	20:22 Uhr	0:00 Uhr	DH,DL,DM	
28.05.2006	0:00 Uhr	6:50 Uhr	DH,DL,DM	Polarisator 90
	6:57 Uhr	9:26 Uhr	DH,DL,DM	Polarisator 0
08.06.2006	14:53 Uhr	17:37 Uhr	DH,DL,DM	neue APD's in DH, DL
19.07.2006	9:02 Uhr	12:48 Uhr	DH,DL,DM	neuer zusätzlicher
				Abschwächer: Vis 25,9
24.07.2006	7:22 Uhr	11:05 Uhr	DH,DL,DM	I2-Zelle
	11:09 Uhr	12:26 Uhr	DH,DL,DM	I2-Abschwächer
07.08.2006	9:20 Uhr		DH,DL,DM	ohne LICEL
	21:41 Uhr		DH,DL,DM	ohne LICEL
	21:47 Uhr		DH,DL,DM	
	21:52 Uhr	23:59 Uhr	DH,DL,DM	19% Abschw. vor DH
	0:00 Uhr	23:59 Uhr	DH,DL,DM	19% Abschw. vor DH
08.08.2006	0:00 Uhr	23:59 Uhr	DH,DL,DM	19% Abschw. vor DH
09.08.2006	0:00 Uhr	15:37 Uhr	DH,DL,DM	19% Abschw. vor DH

B Pulsform im DH-Kanal mit Lawinenphotodioden

Die Messung am 8. Juni hat kurz nach der Umgestaltung der optischen Bank stattgefunden. Bei der Auswertung der Daten war aufgefallen, dass die Elektronik für den DH-Kanal eine doppelt so hohe Zählrate aufweist wie die LICEL-Elektronik für diesen Kanal. Die Ursache hierfür ist die zu hoch gewählte Verstärkung des Hauptverstärkers. Ein hinter dem Hauptverstärker des DH-Kanals abgegriffenes Signal einer Atmosphärenmessung vom 15. August 2006 ist beispielhaft in Abbildung B.1 zu sehen. Hier ist die Verstärkung angepasst. Neben dem eigentlichen Puls ist ein Nachschwingen zu erkennen. Ist die Verstärkung zu hoch gewählt, wie es am 8. Juni der Fall war, wird dieser zusätzliche Puls ebenfalls von der Zählelektronik gezählt. Da die alte Elektronik keinen einstellbaren Diskriminator besitzt, muss die Verstärkung an die Zählelektronik angepasst werden. Die LICEL-Elektronik hat eine einstellbare Diskriminatorschwelle, die während dieser Messung richtig angepasst war, so dass der Nachschwingerpuls von der LICEL-Elektronik nicht mitgezählt wurde. Die doppelte Zählrate wurde bei den weiteren Auswertungen berücksichtigt und korrigiert.

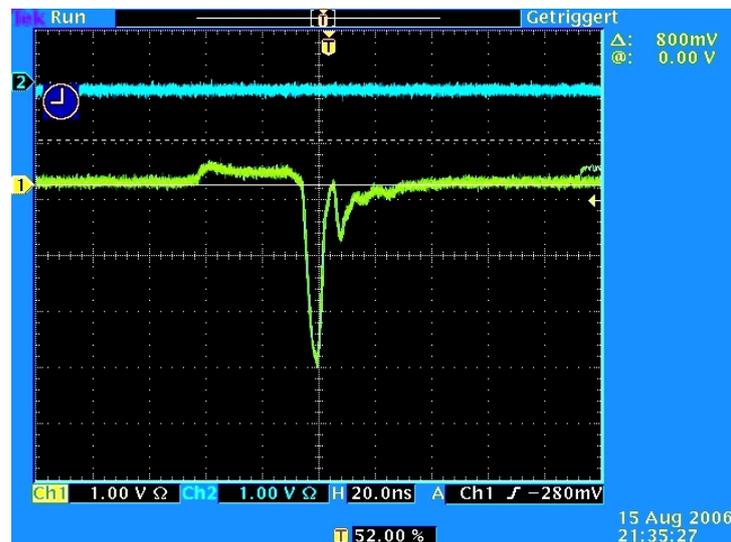


Abbildung B.1: Puls eines aus der Atmosphäre rückgestreuten Photons hinter dem Hauptverstärker des DL-Kanals am 15. August 2006. Es ist neben dem eigentlichen Puls ein Nachschwinger zu erkennen.

C Spikestabelle

Tabelle C.1: Tabellarischer Überblick über alle analysierten Spikes im Zeitraum vom 16. Mai 2006 bis 9. August 2006 für Atmosphären und LED-Testmessungen.

Tag	Messmodus	Elektronik	Teleskop	Kanal	Höhe	Uhrzeit (UTC)
18.05.2006	LED	Alte	SET	DL	75	8:22 Uhr
23.05.2006	LED	Alte	SET	DH	92	7:19 Uhr
	LED	Alte	SET	DL	70	7:24 Uhr
	LED	Alte	SET	DL	95	7:47 Uhr
	LED	Alte	SET	DH	78	9:59 Uhr
	LED	Alte	SET	DH	72	11:55 Uhr
27.05.2006	LED	Alte	NWT	DH	190	20:45 Uhr
	LED	Alte	NWT	DH	195	0:48 Uhr
28.05.2006	LED	Alte	SET	DH	95	7:15 Uhr
	LED	Alte	SET	DH	75	8:00 Uhr
	LED	Alte	SET	DH	138	8:00 Uhr
	LED	Alte	SET	DH	70	8:36 Uhr
	LED	Alte	SET	DH	100	9:23 Uhr
	LED	LICEL	SET	DL	138	8:01 Uhr
	LED	LICEL	SET	DH	138	8:01 Uhr
01.06.2006	Atmosphäre	Alte	NWT	DL	100	18:09 Uhr
	Atmosphäre	Alte	NWT	DL	80	0:14 Uhr
	Atmosphäre	Alte	NWT	DL	45	1:50 Uhr
	Atmosphäre	Alte	NWT	DL	45	2:35 Uhr
	Atmosphäre	Alte	NWT	DL	170	2:44 Uhr
	Atmosphäre	Alte	SET	DH	80	21:55 Uhr
	Atmosphäre	Alte	SET	DL	120	1:59 Uhr
	Atmosphäre	Alte	SET	DL	128	1:59 Uhr

Tag	Messmodus	Elektronik	Teleskop	Kanal	Höhe	Uhrzeit (UTC)
05.06.2006	Atmosphäre	Alte	NWT	DL	35	0:48 Uhr
	Atmosphäre	Alte	NWT	DL	85	2:10 Uhr
	Atmosphäre	Alte	SET	DH	235	1:53 Uhr
	Atmosphäre	Alte	NWT	DL	38	18:21 Uhr
	Atmosphäre	Alte	NWT	DL	85	19:05 Uhr
	Atmosphäre	Alte	NWT	DL	110	19:05 Uhr
08.06.2006	LED	Alte	SET	DL	140	16:50 Uhr
30.06.2006	Atmosphäre	Alte	NWT	DL	65	10:54 Uhr
	Atmosphäre	Alte	NWT	DL	55	11:02 Uhr
	Atmosphäre	Alte	NWT	DL	62	12:40 Uhr
	Atmosphäre	Alte	NWT	DH	235	19:45 Uhr
09.07.2006	Atmosphäre	Alte	NWT	DL	40	13:11 Uhr
	Atmosphäre	Alte	NWT	DL	95	16:56 Uhr
11.07.2006	Atmosphäre	Alte	NWT	DL	120	21:26 Uhr
	Atmosphäre	Alte	NWT	DL	70	23:02 Uhr
19.07.2006	Atmosphäre	Alte	SET	DH	60	9:41 Uhr
07.08.2006	LED	Alte	NWT	DL	20	22:12 Uhr
	LED	Alte	SET	DL	80	23:53 Uhr
08.08.2006	LED	Alte	NWT	DL	70	0:50 Uhr
	LED	Alte	NWT	DL	100	6:41 Uhr
	LED	Alte	NWT	DL	70	13:53 Uhr
	LED	Alte	SET	DL	85	0:58 Uhr
	LED	Alte	SET	DL	100	4:47 Uhr
	LED	Alte	SET	DL	100	5:53 Uhr
	LED	Alte	SET	DH	28	7:58 Uhr
	LED	Alte	SET	DL	88	13:20 Uhr
	LED	Alte	SET	DL	65	14:05 Uhr
	LED	Alte	SET	DL	85	15:41 Uhr
	LED	Alte	SET	DH	60	15:53 Uhr
	LED	Alte	SET	DH	55	16:02 Uhr
	LED	Alte	SET	DH	90	19:16 Uhr
	LED	Alte	SET	DL	100	20:23 Uhr
	LED	Alte	SET	DH	108	21:23 Uhr
	LED	Alte	SET	DH	90	21:32 Uhr
LED	Alte	SET	DL	95	23:21 Uhr	

Tag	Messmodus	Elektronik	Teleskop	Kanal	Höhe	Uhrzeit (UTC)
09.08.2006	LED	Alte	NWT	DL	22	8:00 Uhr
	LED	Alte	NWT	DL	22	8:25 Uhr
	LED	Alte	NWT	DL	40	5:28 Uhr
	LED	Alte	NWT	DL	90	8:41 Uhr
	LED	Alte	NWT	DL	60	10:12 Uhr
	LED	Alte	NWT	DL	40	11:05 Uhr
	LED	Alte	NWT	DL	70	0:00 Uhr
	LED	Alte	SET	DH	90	0:53 Uhr
	LED	Alte	SET	DH	45	0:53 Uhr
	LED	Alte	SET	DH	83	1:11 Uhr
	LED	Alte	SET	DH	70	1:35 Uhr
	LED	Alte	SET	DH	70	6:14 Uhr
	LED	Alte	SET	DL	75	6:41 Uhr
	LED	Alte	SET	DH	100	8:38 Uhr
	LED	Alte	SET	DH	70	9:41 Uhr
	LED	Alte	SET	DH	110	13:14 Uhr

D Fehlerabschätzung bei Zählexperimenten

Der statistische Fehler ΔN einer Zählrate N ist bei Poisson-Statistik gegeben durch:

$$\Delta N = \sqrt{N} \quad (\text{D.1})$$

Werden zwei Zählraten N_1 und N_2 miteinander addiert, subtrahiert, multipliziert oder dividiert pflanzt sich der Fehler gemäß der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung fort. Es gilt

- für die Addition und Subtraktion

$$N = N_1 + N_2 \quad \text{bzw.} \quad N = N_1 - N_2 \quad (\text{D.2})$$

$$\Delta N = \sqrt{(\Delta N_1)^2 + (\Delta N_2)^2} \quad (\text{D.3})$$

- für die Multiplikation und Division

$$N = N_1 \cdot N_2 \quad \text{bzw.} \quad N = \frac{N_1}{N_2} \quad (\text{D.4})$$

$$\Delta N = N \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta N_1}{N_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta N_2}{N_2}\right)^2} \quad (\text{D.5})$$

E Ergebnisse

Hier sind ergänzende Plots zum Ergebniskapitel 5 zusammen gestellt. Aus Gründen der Übersicht wurden diese Plots nicht in Kapitel 5 eingefügt.

E.1 Austausch der Detektoren und Umgestaltung der optischen Bank

E.1.1 Zeitliche Entwicklung der Zählrate für das LED-Licht

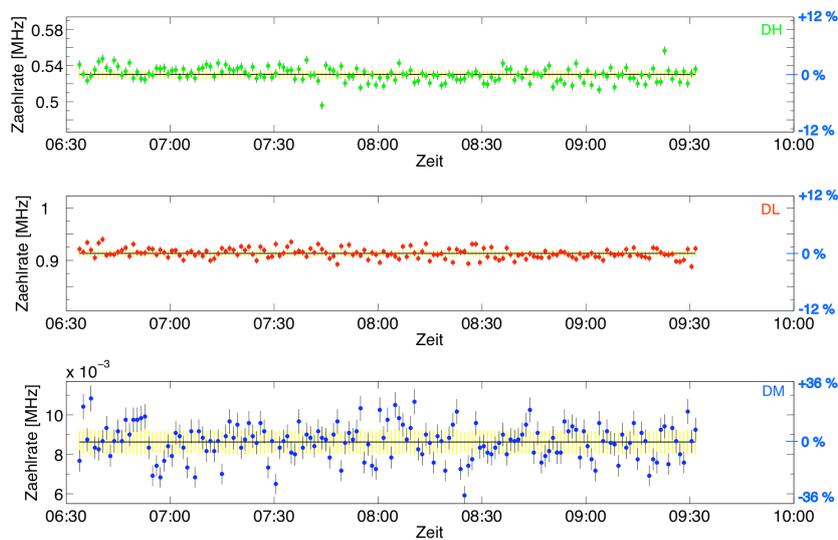


Abbildung E.1: Zeitliche Entwicklung der Zählraten der Photovervielfacher im DH-Kanal (oben), im DL-Kanal (Mitte) und im DM-Kanal (unten) für LED-Licht. Die Skalierung der Achsen wurde auf gleiche Weise wie in Abbildung 5.10 durchgeführt. Für den DM-Kanal wurde sie jedoch wegen der geringeren Zählrate und der daraus resultierenden höheren relativen Zählfehler größer gewählt. Die Messung hat am 23. Mai 2006 stattgefunden

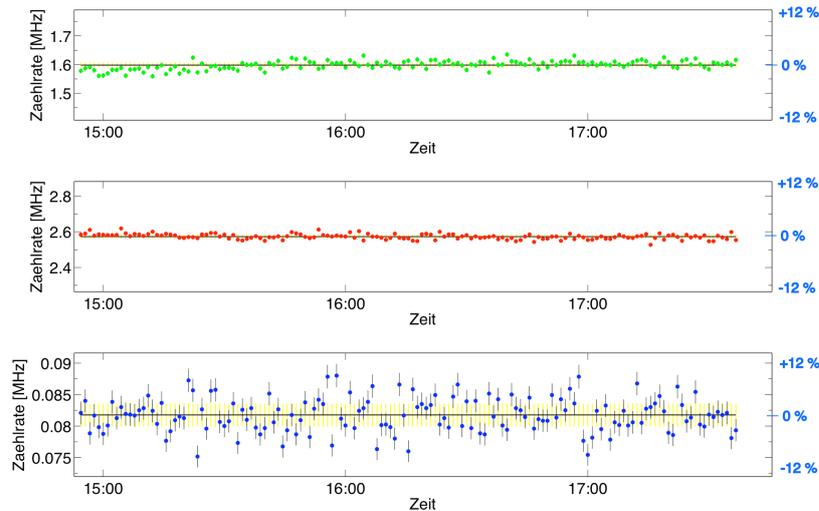


Abbildung E.2: Zeitliche Entwicklung der Zählraten der Lawinenphotodioden im DH-Kanal (oben), im DL-Kanal (Mitte) und im DM-Kanal (unten) für LED-Licht. Die Skalierung der Achsen wurde auf gleiche Weise wie in Abbildung 5.10 durchgeführt. Die Messung hat am 8. Juni 2006 stattgefunden.

E.1.2 Zeitliche Entwicklung des Zählratenverhältnisses für das LED-Licht

In Abbildung E.3 sind die Kanalverhältnisse für das LED-Signal für die Photovervielfacher und in Abbildung E.4 für die Lawinenphotodioden dargestellt. Die Achsenskalierungen sind hierbei für die Verhältnisse DH/DM und DL/DM für die Photovervielfacher $\pm 50\%$ zum Mittelwert und für DL/DH $\pm 10\%$ zum Mittelwert gewählt. Für die Lawinenphotodioden sind sie für DH/DM und DL/DM $\pm 10\%$ vom Mittelwert und für DL/DH $\pm 5\%$ vom Mittelwert gewählt. Daraus werden deutlich geringere Schwankungen für Messung mit den Lawinenphotodioden deutlich. In den Tabellen E.1 und E.2 ist für die Photovervielfacherröhren bzw. die Lawinenphotodioden die relative Standardabweichung, der relative Zählfehler und das Verhältnisse aus diesen beiden Werten für das jeweilige Kanalverhältnis gegeben. Daraus lässt sich erkennen, dass die Lawinenphotodioden für die Kanalverhältnisse DH/DM und DL/DM die besseren Werte aufweisen. Die Photovervielfacher haben jedoch bei dem für die Windmessungen genutzten Kanalverhältnis DL/DH das bessere Verhältnis von Zählfehler zu Standardabweichung. Bei der Betrachtung der zeitlichen Entwicklung fällt für das Kanalverhältnis DL/DH, wie ich schon zuvor für das Seederlicht beobachtet, ein abfallender Trend des Verhältnisses zu Beginn der Messung auf. Dies hat eine größere Standardabweichung zur Folge.

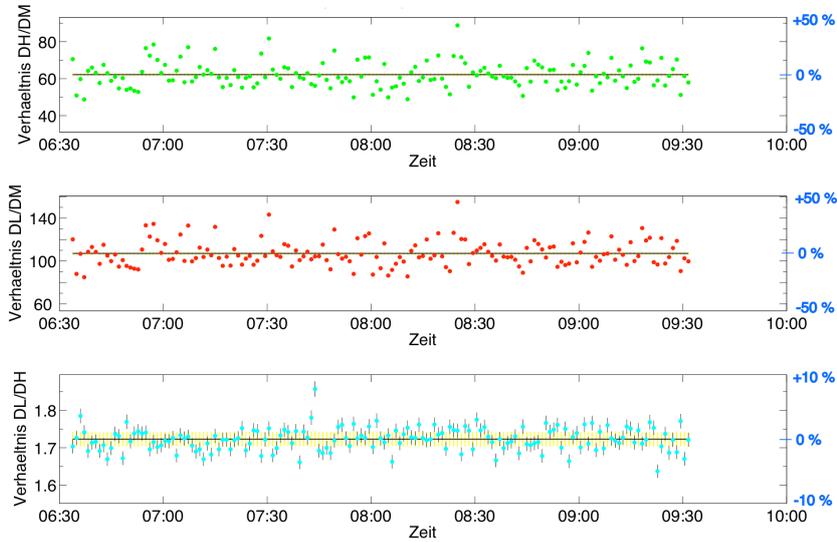


Abbildung E.3: Zeitliche Entwicklung der Kanalverhältnisse DH/DM (oben), DL/DM (Mitte) und DL/DH (unten) für das LED-Licht für die Photovervielfacherröhren. Die linke Ordinate gibt das Kanalverhältnis an, die rechte die Verhältnisänderung zum Mittelwert. Die Ordinaten sind so skaliert, dass DH/DM und DL/DM relativ zueinander gleich sind. Aufgrund der geringeren Streuung wurde für DL/DH eine kleinere Skalierung gewählt. Die Messung hat am 23. Mai stattgefunden.

Tabelle E.1: Relative Standardabweichung δZ , relativer Zählfehler ΔZ und das Verhältnis zwischen dem relativen Zählfehler und der relative Standardabweichung $\Delta Z/\delta Z$ für die Photovervielfacherdioden für das LED-Licht

	δZ	ΔZ	$\delta Z/\Delta Z$
DH/DM	0,1095	0,1001	1,093
DL/DM	0,1089	0,0997	1,092
DL/DH	0,0175	0,0158	1,108

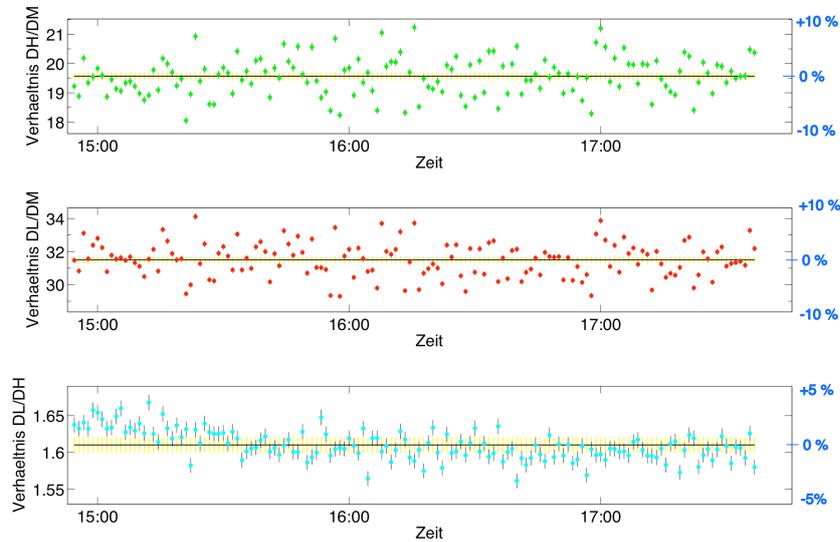


Abbildung E.4: Zeitliche Entwicklung der Kanalverhältnisse DH/DM (oben), DL/DM (Mitte) und DL/DH (unten) für das LED-Licht für die Lawinenphotodioden. Die linke Ordinate gibt das Kanalverhältnis an, die rechte die Verhältnisänderung zum Mittelwert. Die Ordinaten sind so skaliert, dass DH/DM und DL/DM relativ zueinander gleich sind. Aufgrund der geringeren Streuung wurde für DL/DH eine kleinere Skalierung gewählt. Die Messung hat am 8. Juni stattgefunden.

Tabelle E.2: Relative Standardabweichung δZ , relativer Zählfehler ΔZ und das Verhältnis zwischen der relative Standardabweichung und dem relativen Zählfehler $\delta Z/\Delta Z$ für die Lawinenphotodioden für das LED-Licht

	δZ	ΔZ	$\delta Z/\Delta Z$
DH/DM	0,0330	0,0328	1,006
DL/DM	0,0327	0,0325	1,006
DL/DH	0,0123	0,0092	1,337

E.2 Vergleich der Zählelektroniken

E.2.1 Konfiguration der optischen Bank für 37-stündige Messung

In dieser Konfiguration hat die in Abschnitt 5.2 diskutierte 37-stündige LED-Messung stattgefunden.

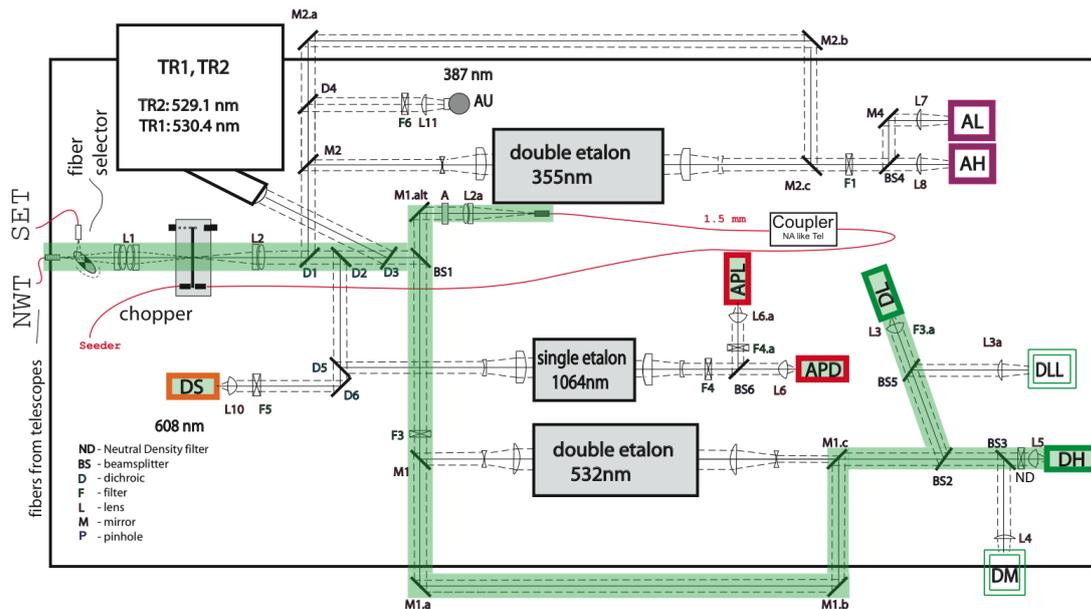


Abbildung E.5: Aufbau der optischen Bank für 37-stündige LED-Testmessung. Die für diesen Test relevanten Lichtwege sind grün hinterlegt. Im Vergleich zum Aufbau in Abbildung 5.1 befindet sich hier der Strahlteiler BS2 und der Abschwächer ND im Aufbau. Die Messung hat vom 7. August 2006 21:52 UTC bis 9. August 2006 15:37 UTC stattgefunden.

E.2.2 Zeitliche Entwicklung der Zählrate für das Seederlicht und den DL-Kanal

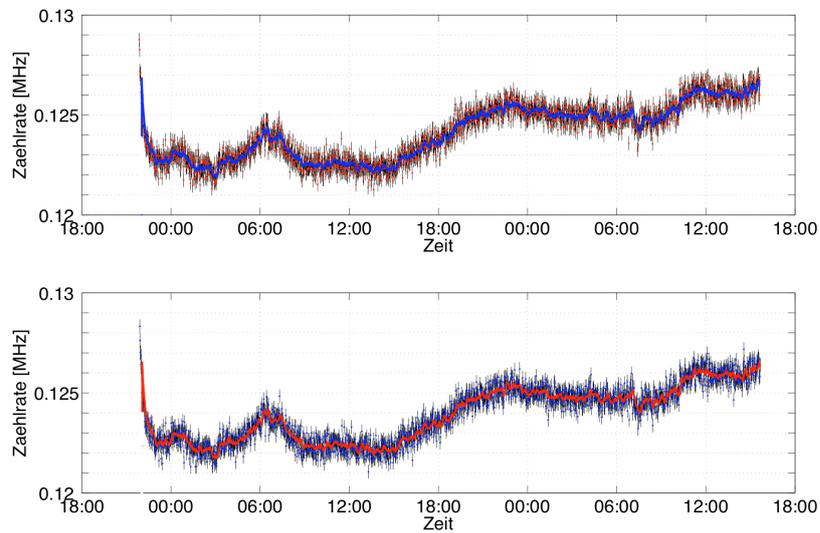


Abbildung E.6: Zeitliche Entwicklung für das Seederlicht für den DL-Kanal für die alte Elektronik (oben) und die LICEL-Elektronik (unten). Die Messung hat vom 7. bis 9. August 2006 stattgefunden.

E.2.3 Zeitliche Entwicklung der Zählrate für das LED-Licht

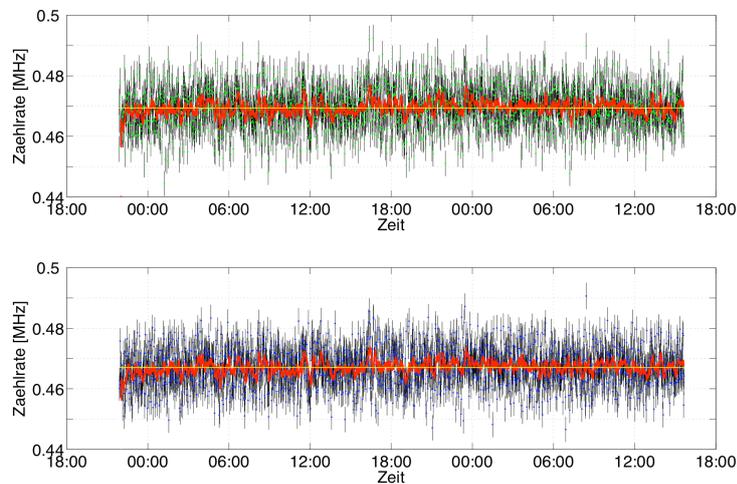


Abbildung E.7: Zeitliche Entwicklung der Zählrate für das LED-Licht für den DH-Kanal für die alte Elektronik (oben) und die LICEL-Elektronik (unten). Die Messung hat vom 7. bis 9. August 2006 stattgefunden.

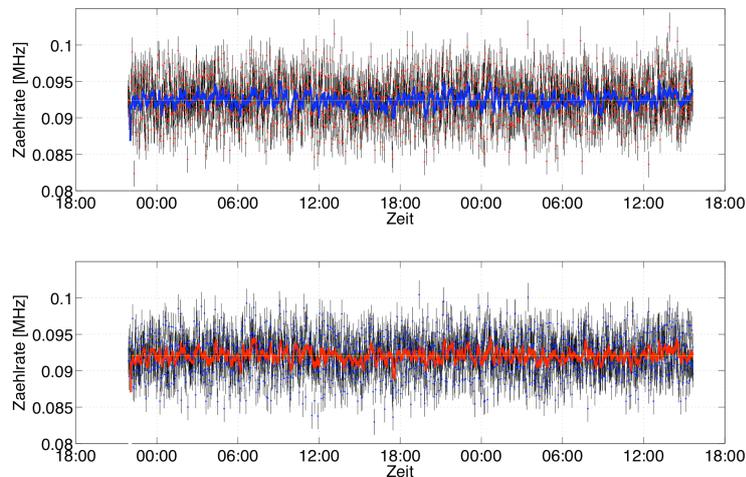


Abbildung E.8: Zeitliche Entwicklung der Zählrate für das LED-Licht für den DL-Kanal für die alte Elektronik (oben) und die LICEL-Elektronik (unten). Die Messung hat vom 7. bis 9. August 2006 stattgefunden.

Literaturverzeichnis

- Baumgarten, G. (2001), Leuchtende Nachtwolken an der polaren Sommermesopause: Untersuchung mit dem ALOMAR Rayleigh/Mie/Raman Lidar, Dissertation, Universität Bonn.
- Cabannes, J. (1929), Change in wavelength by molecular scattering, *Physical Review*, 34(11), 1497.
- Ebeling, K. J. (1992), *Integrierte Optoelektronik*, 2. Ausg., Springer-Verlag.
- Einstein, A. (1905), Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt, *Annalen der Physik*, 322(6), 132–148.
- Enke, M. (1994), Berechnung, Aufbau und Erprobung einer aktiven Laserstrahlführung, Diplomarbeit, Universität Rostock.
- Fiedler, J., und G. von Cossart (1999), Automated lidar transmitter for multiparameter investigations within the Arctic atmosphere, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(2), 748–755.
- Fleming, E. L., S. Chandra, J. J. Barnett und M. Corney (1990), Zonal mean temperature, pressure, zonal wind, and geopotential height as functions of latitude, COSPAR international reference atmosphere: 1986, Part II: Middle atmosphere models, *aisr*, 10(12), 11–59.
- Hamamatsu Photonics K.K. (2001), Photon Counting Using Photomultiplier Tubes, *Tech. Ber.*, Electron Tube Center.
- Hamamatsu Photonics K.K. (2006), *Photomultiplier tubes, Basics and applications*, 3. Ausg., Hamamatsu Writing, Inc.
- Hübner, F. (1998), Temperaturen der mittleren polaren Atmosphäre (15–80 km): Beobachtungen mit dem ALOMAR Rayleigh/Mie/Raman-Lidar 1995 und 1996 und Vergleiche, Dissertation, Universität Rostock.
- Korb, C. L., B. M. Gentry und C. Y. Weng (1992), Edge technique: Theory and application to the lidar measurement of atmospheric wind, *Applied Optics*, 31(21), 4202–4213.

- Mie, G. (1908), Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen, *Annalen der Physik*, 25(3), 377–445.
- Raman, C. V., und K. S. Krishnan (1928), A new type of secondary radiation, *Nature*, 121(3048), 501–502.
- Saleh, B. E. A., und M. C. Teich (1991), *Photonics*, John Wiley & Sons, Inc.
- Schöch, A., und G. Baumgarten (2003), A new system for automatic beam stabilisation of the ALOMAR RMR-lidar at Andøya in Northern Norway, in *Proceedings of the 16th ESA Symposium on European Rocket and Balloon Programmes and Related Research*, Bd. ESA SP-530, bearbeitet von B. Warmbein, S. 303–307, St. Gallen, Switzerland.
- von Zahn, U., G. von Cossart, J. Fiedler, K. H. Fricke, G. Nelke, G. Baumgarten, D. Rees, A. Hauchecorne und K. Adolfsen (2000), The ALOMAR Rayleigh/Mie/Raman lidar: Objectives, configuration, and performance, *Ann. Geophysicae*, 18, 815–833.
- Wagner, D. (2000), Eine automatisierte Laserstrahl-Stabilisierung für das ALOMAR-RMR-Lidar, Diplomarbeit, Universität Bonn.
- Weitkamp, C. (Hrsg.) (2005), *Lidar – Range-resolved optical remote sensing of the atmosphere*, Springer.
- Young, A. T. (1981), Rayleigh scattering, *Applied Optics*, 20(4), 533–535.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Zonalwind aus der CIRA86 Referenzatmosphäre	7
1.2	Das ALOMAR Observatorium im Oktober 2005	9
2.1	Prinzip des Lidar	11
2.2	Schematische Darstellung der Dopplerverbreiterung und Dopplerverschiebung	14
2.3	Schematische Darstellung der Kantentechnik	17
2.4	Prinzip einer Photoervielfacherröhre	19
2.5	Die Pulse am Ausgang der Photoervielfacherröhre bei hohen Lichtintensitäten	21
2.6	Pulse am Ausgang der Photoervielfacherröhre bei niedrigen Lichtintensitäten	21
2.7	Prinzip einer Photodiode	22
3.1	Skandinavienkarte mit ALOMAR	25
3.2	Das ALOMAR-Observatorium im Oktober 2005	26
3.3	Prinzipskizze der Laserbank und des Seedlasers	29
3.4	Prinzipskizze der Teleskope und der Strahlführung in der Teleskophalle	31
3.5	Prinzipskizze der optischen Bank im Herbst 2006	33
3.6	Prinzipskizze der optischen Bank in der DoRIS-Konfiguration	35
3.7	Das Rückstreusignal aus einer Atmosphärenmessung und das LED-Signal	36
3.8	Schematischer Systemaufbau für die simulierten Atmosphärenmessungen	37
4.1	LED-Testmessung vom 23.05.2006 mit Spike bei 92 km	38
4.2	Das Transmissionsspektrum der Jodzelle sowie ein dazu überlagertes dopplerverschobenes und ein nicht dopplerverschobenes Rückstreusignal.	40
5.1	Die optische Bank vor und nach der Umgestaltung	42
5.2	Verhältnis DL/DH für Photoervielfacherröhren	43
5.3	Verhältnis DL/DH. Links mit Polarisator bei $\phi = 0^\circ$ und bei $\phi = 45^\circ$	44

5.4	Das Signalverhältnis DL/DH für die neue Konfiguration der optischen Bank	45
5.5	Spikes im LED-Signal und im Untergrund	46
5.6	Übersicht aller identifizierten Spikes für Photovervielfacherröhren und Lawinenphotodioden	47
5.7	Nachweiseffizienz des DH-Kanals aus allen Atmosphärenmessungen von Januar bis Oktober	48
5.8	Einfluss der Totzeitkorrektur auf die Auswertung von Messungen mit Lawinenphotodiode	50
5.9	Linearität für die Konfiguration vor dem Umu mit Photovervielfachern in den Kanälen DH und DL und nach dem Umbau mit Lawinenphotodioden in den Kanälen DH und DL	52
5.10	Zeitliche Entwicklung der Zählraten der Photovervielfacher im DH-Kanal, im DL-Kanal und im DM-Kanal für Seederlicht	55
5.11	Die Ausgangsintensität des Seedlasers bei 532 nm während der Messung mit den Photovervielfacherröhren am 23. Mai 2006	55
5.12	Zeitliche Entwicklung der Zählraten der Lawinendioden im DH-Kanal, im DL-Kanal und des Referenzphotovervielfachers im DM-Kanal für Seederlicht	56
5.13	Die Intensität des Seedlasers während der Messung mit den Lawinenphotodioden am 8. Juni 2006	56
5.14	Zeitliche Entwicklung der Kanalverhältnisse DH/DM, DL/DM und DL/DH für das Seederlicht für die Photovervielfacherröhren	58
5.15	Zeitliche Entwicklung der Kanalverhältnisse DH/DM, DL/DM und DL/DH für das Seederlicht für die Lawinenphotodioden	58
5.16	Fluktuation des Kanalverhältnisses um den Mittelwert dargestellt als Histogramm für DH/DM, DL/DM und DL/DH für das Seederlicht für die Photovervielfacherröhren und die Lawinenphotodioden	59
5.17	Die einzigen Spikes in LICEL-Elektronik	61
5.18	Zeitliche Entwicklung der Zählrate für das Seederlicht für den DH-Kanal für die alte Elektronik und die LICEL-Elektronik	63
5.19	Die Ausgangsintensität des Seedlasers bei 532 nm während der 37-stündigen Messung vom 7. - 9. August 2006	63
5.20	Die Linearität für die alte Elektronik und die LICEL-Elektronik für die Kanäle DH und DL	65
5.21	Zeitliche Entwicklung des Kanalverhältnisses DL/DH für das Seedlaserlicht für die alte Elektronik und die LICEL-Elektronik	67
5.22	Fluktuation des Kanalverhältnisses um den Mittelwert dargestellt als Histogramm für DL/DH für die alte Elektronik und die LICEL-Elektronik für das Seederlicht	67
5.23	Zeitliche Entwicklung des Kanalverhältnisses DL/DH für die alte Elektronik und die LICEL-Elektronik für das LED-Licht	69

B.1	Puls und Nachschwinger eines aus der Atmosphäre rückgestreuten Photons.	74
E.1	Zeitliche Entwicklung der Zählraten der Photoervielfacher im DH-Kanal, im DL-Kanal und im DM-Kanal für LED-Licht	79
E.2	Zeitliche Entwicklung der Zählraten der Lawinenphotodioden im DH-Kanal, im DL-Kanal und im DM-Kanal für LED-Licht	80
E.3	Zeitliche Entwicklung der Kanalverhältnisse DH/DM, DL/DM und DL/DH für das LED-Licht für die Photoervielfacherröhren	81
E.4	Zeitliche Entwicklung der Kanalverhältnisse DH/DM, DL/DM und DL/DH für das LED-Licht für die Lawinenphotodioden	82
E.5	Aufbau der optischen Bank für 37-stündige LED-Testmessung	83
E.6	Zeitliche Entwicklung für das Seederlicht für den DL-Kanal für die alte Elektronik und die LICEL-Elektronik	84
E.7	Zeitliche Entwicklung der Zählrate für das LED-Licht für den DH-Kanal für die alte Elektronik und die LICEL-Elektronik	85
E.8	Zeitliche Entwicklung der Zählrate für das LED-Licht für den DL-Kanal für die alte Elektronik und die LICEL-Elektronik	85

Tabellenverzeichnis

3.1	Übersicht über die Nachweiskanäle des RMR-Lidar.	32
5.1	Relative Standardabweichung δZ , relativer Zählfehler ΔZ und das Verhältnis zwischen der relative Standardabweichung $\delta Z/\Delta Z$ und dem relativen Zählfehler für die Photovervielfacher und die Lawinenphotodioden für das Seederlicht	59
5.2	Absolute Anzahl der Zählereignisse für die alte und die LICEL-Elektronik.	64
5.3	Relative Standardabweichung δZ , relativer Zählfehler ΔZ und das Verhältnis zwischen der relative Standardabweichung und dem relativen Zählfehler $\delta Z/\Delta Z$ für die alte und die LICEL-Elektronik für das Seederlicht	66
5.4	Relative Standardabweichung δZ , relativer Zählfehler ΔZ und das Verhältnis zwischen der relative Standardabweichung und dem relativen Zählfehler $\delta Z/\Delta Z$ für die alte und die LICEL-Elektronik für das LED-Licht	68
A.1	Tabellarischer Überblick über alle LED-Testmessungen	73
C.1	Tabellarischer Überblick über alle analysierten Spikes im Zeitraum vom 16. Mai 2006 bis 9. August 2006 für Atmosphären und LED-Testmessungen.	75
E.1	Relative Standardabweichung δZ , relativer Zählfehler ΔZ und das Verhältnis zwischen dem relativen Zählfehler und der relative Standardabweichung $\Delta Z/\delta Z$ für die Photovervielfacherdioden für das LED-Licht	81
E.2	Relative Standardabweichung δZ , relativer Zählfehler ΔZ und das Verhältnis zwischen der relative Standardabweichung und dem relativen Zählfehler $\delta Z/\Delta Z$ für die Lawinenphotodioden für das LED-Licht	82

Hiermit versichere ich, diese Arbeit eigenständig und nur unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel und Quellen verfasst zu haben.

Kühlungsborn, 22. Dezember 2006

(Julia Amthor)

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich recht herzlich bei dem Leiter des Institutes für Atmosphärenphysik Herrn Prof. Dr. Lübken für die Ermöglichung dieser Arbeit bedanken. Auf Seiten der TU Hamburg-Harburg danke ich Herrn Prof. Dr. Brinkmeyer für die Betreuung.

Herrn Dr. Gerd Baumgarten gilt mein besonderer Dank für die direkte Betreuung, die Anregungen und Diskussionen sowie die interessanten ALOMAR-Aufenthalte.

Auch möchte ich Herrn Dr. Jens Fiedler und Herrn Prof. Dr. von Cossart herzlich danken, die mir während meiner Aufenthalte auf ALOMAR geholfen haben, mich in die komplexe Technik einzuarbeiten.

Ein großes Dankeschön geht an Herrn Armin Schöch: Danke, dass Du für mich und meine tausend Fragen immer ein offenes Ohr hattest und diese stets geduldig beantwortet hast.

Vielen Dank auch an Herrn Torsten Köpnick, an den ich mich ebenfalls immer mit meinen Fragen wenden konnte.

Tusen takk til dere på ALOMAR for støtten deres og for en trivelig tid på Andøya!

Vielen Dank an das gesamte IAP für eine nette und angenehme Arbeitsatmosphäre sowie für eine sehr interessante Zeit in Kühlungsborn.

Vielen Dank auch an all diejenigen, die zu mir gehalten und mich während meiner Nachtschichten aufgemuntert haben.

Meinen Eltern bin ich dankbar, dass sie mir dieses Studium ermöglicht und mich stets unterstützt haben.