

Fakultät für Physik und Astronomie

Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg

Diplomarbeit

im Studiengang Physik

vorgelegt von

**Erich Schreiber
aus Banska Bystrica**

2005

**Aufbau eines Messsystems für Reflektionsmessungen
an H.E.S.S.-Teleskopen**

Die Diplomarbeit wurde von Erich Schreiber ausgeführt am

Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg
unter der Betreuung von

Herrn Prof. Dr. Werner Hofmann

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Detektion kosmischer Gammastrahlung	3
3	Das H.E.S.S.-System	5
3.1	Entstehung der Luftschauer und des Bildes	5
3.2	Lage und Aufbau	6
3.3	Der Spiegelträger	7
3.4	Die Spiegel	7
4	Reflektivitätsmessungen an Einzelspiegeln	12
4.1	Messprinzip des 2F-Verfahren	12
4.2	Erweiterung für Tageslichtmessungen	14
4.2.1	Funktionsweise eines Lock-In Verstärkers	15
4.2.2	Optischer Pulsformer und Rausch-Signal-Verhältnis	17
4.2.3	Strom-Spannungs-Wandler	19
4.2.4	LED als weitere Lichtquelle	20
4.3	Spiegelmessungen	23
4.3.1	Lichtfeldmessung und Einzelspiegel	23
4.3.2	Rauschunterdrückung	26
4.3.3	2F-Messaufbau für Messungen bei $F=35$ m	27
4.3.4	Messungen an hochreflektiven Folien	33
5	Messverfahren zur Reflektivitätsbestimmung der H.E.S.S.-Teleskope	35
5.1	Mögliche Messverfahren	35
5.1.1	Messung mit dem Handreflektometer	35
5.1.2	2F-Methode mit Scantisch	36
5.1.3	2F-Methode mit Teleskop	36
5.1.4	20F-Methode	37
5.2	Anforderungen an die Messmethoden und Realisierung	37
5.2.1	2F-Methode	37
5.2.2	20F Methode	45

5.2.3	Signalübertragung	48
6	Messaufbau in Namibia und Ergebnisse	54
6.1	2F-Messungen	54
6.1.1	Aufbau des 2F Messstandes	54
6.1.2	Ergebnisse	57
6.2	20F-Messung	60
6.2.1	Aufbau des 20F Messtandes	60
6.2.2	Berechnung der Reflektivität	64
6.3	Vergleich der 2F/20F-Messungen	66
7	Zusammenfassung	68
7.1	2F-Messungen an Einzelspiegeln	68
7.2	Reflektivitätsmessungen an Teleskopen	68
	Literatur	71

Seit nunmehr einem Jahr sind alle 4 H.E.S.S.-Teleskope in Namibia in Betrieb und haben zur Entdeckung neuer Quellen kosmischer Strahlung beigetragen. Der Bau eines weiteren grösseren Teleskops mit 600 m² Spiegelfläche ist in Planung. Ein 2F-Messaufbau zur Bestimmung der gerichteten Reflektivität von Einzelspiegeln wurde um einen optischen Pulsformer und einen Lock-In Verstärker erweitert, damit diese bei Tageslicht und langer Messstrecke gemessen werden können.

Mit dem Baubeginn des ersten Teleskops, Ende 2001, und der Montierung der Spiegel, sind diese den täglichen Umweltbedingungen ausgesetzt.

Um zu überprüfen wie stark sich dies auf die Reflektivität auswirkt, wurden daher zwei Messverfahren realisiert welche es ermöglichen die Reflektivität jedes Teleskops zu bestimmen. Im ersten Verfahren, dem 2F-Messaufbau, wurde das Teleskop durch eine LED-Lichtquelle in 30 m Entfernung beleuchtet und das reflektierte Licht mit einer auf einem Scantisch befestigten Photodiode vermessen. Im 20F-Verfahren wird das Licht einer in 300 m entfernten Lichtquelle auf dem Kameradeckel abgebildet und durch eine Photodiode gemessen. Das Teleskop fährt dabei den Lichtfleck ab. Beide Verfahren haben den Vorteil keine externen Referenzgrössen wie z.B. geeichte Photodiode, zu benötigen, da sich bei der Berechnung der Reflektivität immer auf eine im direkten Lichtstrahl gemessene Referenzintensität bezogen wird. Diese Arbeit geht detailliert auf beide Methoden ein, erklärt die durchgeführten Tests und die erforderlichen Komponenten. Die Ergebnisse beider Methoden zeigen eine Reflektivität zwischen (69-75)%, je nach Teleskop. Das 2F-Verfahren wurde ausgewählt um als ständiger Aufbau in Namibia routinemässig die Reflektivität der H.E.S.S.-Teleskope zu messen.

Since one year all 4 H.E.S.S. telescopes are fully operational in Namibia and have contributed to the discovery of new sources of cosmic rays. In near future another bigger telescope with a mirror area of 600 m² of will be built. The 2F-setup for measuring the reflectivity of single mirrors was upgraded with an optical chopper and a Lock-In amplifier, so that it is possible to measure in daylight and in a greater distance.

Since the construction of the first telescope, end of 2001, the mirrors have been exposed to the environmental factors. In order to quantify this effect on the reflectivity of the mirrors, two setups were established to measure the reflectivity of each telescope. In the first method, called 2F-setup, the telescope is illuminated by a LED in 30 m distance to the telescope and the reflected light is measured with a photodiode mounted on a scan table. Using the second method, called 20F-setup, the light of a LED in 300 m distance is reflected onto the camera lid and is measured with a photodiode, the telescope scans over the light spot. Both methods need no devices like calibrated photodiodes, lightsources and mirrors with a known reflectivity. This thesis describes in detail both methods and the systematic tests. The measured reflectivity is in the range of (69-75)%. The 2F-setup will be used to measure routinely the reflectivity of the H.E.S.S telescopes.

Kapitel 1

Einleitung

Anfang des letzten Jahrhunderts waren Photoplatten das beste Nachweismittel um Teilchen nachzuweisen. Die erkennbaren Spuren stammten vornehmlich aus der Radioaktivität der Umgebung. Man erwartete, dass die Zahl der Spuren auf den Photoplatten mit der Entfernung zur Erdoberfläche abnehmen würden. Erste Experimente in Ballonflügen zeigten jedoch, dass ab einer gewissen Höhe stattdessen mehr Teilchen ihre Spuren hinterliessen. Der Entdecker und Pionier dieser Kosmischen Höhenstrahlung, Victor Hess, hatte damit das Tor zur Astroteilchenphysik aufgestossen. Auch heute, fast ein Jahrhundert später, sind immer noch viele Fragen über die Entstehung der Teilchen und deren Ursprung ungeklärt. Der grösste Teil der kosmischen Strahlung besteht aus Hadronen, 99%, wie Protonen oder α -Teilchen bestehen. Ein geringer Teil, weniger als 1%, besteht aus Leptonen, wie Elektronen oder Myonen. Doch nur der geringste Anteil der kosmischen Strahlung, ungeladene Teilchen wie z.B. Neutrinos und Gammaquanten, bieten die Möglichkeit unverfälscht an Information zu gelangen. Denn diese werden nicht durch Magnetfelder abgelenkt und behalten so ihre Richtungsinformation. Gerade das Gebiet der Gamma-Astronomie hat in den letzten 30 Jahren einen enormen Fortschritt erfahren. Neben Satellitenexperimenten zum Nachweis dieser Photonen werden sogenannte Cherenkov-Teleskope benutzt, welche den Effekt ausnutzen, dass die die Lufthülle durchquerenden Gammaquanten einen Luftschauer auslösen. Dieser Luftschauer produziert das sogenannte Cherenkovlicht, welches dann über die Teleskopspiegel reflektiert und in einer Kamera aus Photovervielfachern nachgewiesen wird. Immer grössere Nachweisflächen, empfindlichere Nachweisgeräte und die Stereoskopie senken die Nachweisenergieschwelle und verkürzen die Zeit, welche nötig ist um ein Objekt nachzuweisen. Das H.E.S.S.-System (High Energy Stereoscopic System) ist das zur Zeit modernste Cherenkov-Teleskop-System mit 4 Teleskopen auf dem Khomas-Hochland von Namibia.

Eine tragende Rolle spielen hierbei die Spiegel der Teleskope. Sie sammeln das Cherenkovlicht ein und bilden es in einer Kamera im Primärfokus aus 960 lichtempfindlichen Detektoren (Photovervielfachern) ab. Aus der Intensität des auf die Kamera reflektierten Lichtes wird die Energie des Gammaphotons bestimmt. Für eine

korrekte Energiebestimmung ist es notwendig zu wissen wieviel Prozent des auf die Spiegel einfallenden Cherenkovlichtes gerichtet reflektiert werden. Alle Spiegel wurden vor der Montage bez. gerichteter Reflektivität und Abbildungsqualität vermessen, so dass bei Inbetriebnahme die Reflektivität eines jeden Teleskopes bekannt war. Durch Umwelteinflüsse wie Regen oder Staub sinkt jedoch die Reflektivität mit der Zeit. Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde daher ein Messaufbau entwickelt, der es ermöglicht, innerhalb einer Stunde die Reflektivität eines H.E.S.S.-Teleskops mit einer Genauigkeit von 3% zu bestimmen. Weiterhin wurde ein bestehender Aufbau zur Charakterisierung von H.E.S.S.-Spiegeln erweitert, so dass Spiegel des neuen Teleskops mit einer Brennweite von $F=35$ m bei Tageslicht gemessen werden können.

In Kapitel 2 wird genauer auf die Entstehung und Nachweis von Gammquanten eingegangen. Kapitel 3 gibt einen Überblick über das Nachweissystem der H.E.S.S.-Teleskope. Der Spiegelträgeraufbau und die Spiegel werden genauer erklärt. In Kapitel 4 wird der neue Messaufbau für Einzelspiegelmessungen erklärt. Dabei wird besonders auf den Lock-In Verstärker und den Strom-Spannungs-Wandler eingegangen. Es werden die Ergebnisse der Messung von hexagonalen Spiegelprototypen mit $F=35$ m gezeigt. Messverfahren zur Reflektivitätsmessung an Teleskopen werden in Kapitel 5 vorgestellt. Hierbei wird auf die besonders geeignete 2F- und 20F-Verfahren Bezug genommen. Vor- und Nachteile werden diskutiert, sowie die Realisierung beider Verfahren vorgestellt. Dabei wird auf das Messsystem, daran gestellte Anforderungen und systematische Tests genau eingegangen. Kapitel 6 befasst sich mit dem Aufbau in Namibia und den Ergebnissen der Reflektivitätsmessungen. In Kapitel 7 wird eine Zusammenfassung und ein Ausblick auf weitere Messungen gegeben.

Kapitel 2

Detektion kosmischer Gammastrahlung

In den letzten 20 Jahren konnten durch die Entwicklung neuer Nachweistechiken und durch Satellitenexperimente zahlreiche Gammaquellen entdeckt werden. Durch die Ladungsneutralität der Gammaquanten können diese, unbeeinflusst durch interstellare Magnetfelder, den Weltraum durchqueren und dabei ihre Richtungsinformation beibehalten. Durch die Grösse des Energiebereichs von 10^9 eV bis zu 10^{20} eV ist es nicht möglich, diesen mit nur einem Experiment abzudecken. Für jeden Energiebereich haben sich verschiedene Nachweistechiken durchgesetzt. Gammaquanten von Energien bis zu 10^{10} eV werden mit Ballon- und Satellitenexperimenten nachgewiesen. Dies hat den Vorteil, dass keine oder nur wenige Beeinflussung durch die Atmosphäre geschieht. Durch erste Experimente wurde gezeigt, dass der Fluss entsprechend einem Potenzgesetz abfällt, s. Glg. 2.1.

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-\alpha} \quad (2.1)$$

Der Exponent ist dabei für jede Quelle verschieden und liegt im Bereich von 2 bis 3. Durch die geringe Nachweisfläche sind Satelliten- und Ballonexperimente nur bis zu einer Energie von 10^{10} eV - 10^{11} eV möglich. Gammaquanten mit Energien zwischen 10^{10} eV - 10^{14} eV kollidieren mit den Luftmolekülen und erzeugen einen atmosphärischen Teilchenschauer. Die entstandenen Sekundärteilchen können direkt am Boden detektiert, das von sehr schnellen Teilchen erzeugte Cherenkovlicht mit Teleskopen nachgewiesen werden. Eines der ersten Experimente, die Cherenkovteleskope verwendeten, war z.B. Whipple. Mit HEGRA wurde zum ersten Mal Stereoskopie betrieben in dem fünf Teleskope gleichzeitig das Cherenkovlicht detektierten. Die neueste Generation mit vergrößerter Spiegelfläche und besseren Detektoren sind das H.E.S.S.-System in Namibia, das Cangaroo-System in Australien, das MAGIC Teleskop auf La Palma, sowie das noch im Bau befindliche VERITAS-System in den USA.

Aus kernphysikalischen Versuchen an Beschleunigerexperimenten ist bekannt,

dass bei Prozessen mit sehr hohen Energien Gammaphotonen als Sekundärteilchen entstehen. Daher werden als Quellen kosmischer Strahlung zumeist Objekte in Frage kommen, welche Primärteilchen mit sehr hoher Energie erzeugen. Die geladenen Teilchen der kosmischen Strahlung wechselwirken mit der umgebenden Materie oder anderen Photonen. Die Gammaquanten werden dabei primär durch 4 Prozesse erzeugt. Durch inverse Comptonstreuung von hochenergetischen Elektronen an Photonen, z.B. der kosmischen Hintergrundstrahlung, wird Energie der Elektronen auf die Photonen übertragen. Emission von Bremsstrahlung von Elektronen/Positronen bei Streuung an Kernen sowie die Emission von Synchrotronstrahlung bei Objekten hoher Magnetfeldstärke sind vorstellbar. Der Zerfall von neutralen Pionen in zwei Photonen liefert ebenfalls hochenergetische Photonen.

Wie die Primärteilchen auf die benötigten hohen Energien beschleunigt werden, hängt eng mit den Eigenschaften des Objektes zusammen. Durch diffuse Beschleunigung an Schockfronten von Supernova-Überresten wird Energie auf das Teilchen übertragen. Durch mehrmalige Reflektion an Streuzentren kann es diese mehrmals hin- und zurück durchqueren und dabei hohe Energien erreichen. Da die meisten Quellen bisher nur als Punktquellen auflösbar sind, wird erschwert, welcher Beschleunigungsmechanismus Spektrum und Fluss des beobachteten Objektes erklärt. Mit dem H.E.S.S.-System gelang es erstmals, einen Supernovaüberrest, s. Abb. Abb. 2.1, als ausgedehntes Objekt aufzulösen und zu zeigen, dass tatsächlich Gammaquanten in der durch die Supernova entstandenen Schockwelle produziert werden. Dies ist ein sehr wichtiger Schritt in Richtung eines besseren Verständnis der physikalischen Prozesse.

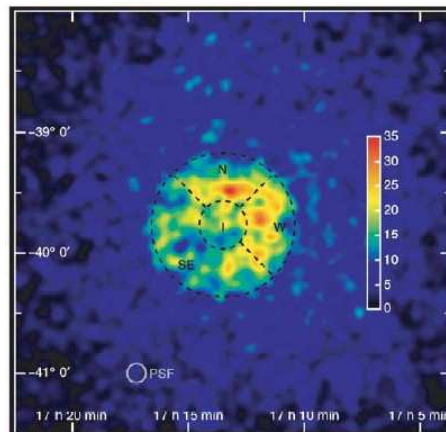


Abbildung 2.1: Bild des Supernova-Überrest RX J1713.7-3946, gemessen mit den H.E.S.S.-Teleskopen [1]

Kapitel 3

Das H.E.S.S.-System

3.1 Entstehung der Luftschaer und des Bildes

Durchquert ein kosmisches Teilchen die Lufthülle der Erde, kommt es zu einer Flut von Teilchenerzeugungen, die einen Luftschaer bilden. Dabei entstehen geladene Teilchen durch Wechselwirkung der kosmischen Teilchen mit den Luftmolekülen. Das Cherenkovlicht entsteht, wenn sich die erzeugten geladenen Teilchen mit einer Geschwindigkeit durch die Atmosphäre bewegen, die grösser ist als die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes in der Atmosphäre.

Das erzeugte Cherenkovlicht wird dabei in Vorwärtsrichtung emittiert und bildet einen Lichtkegel von etwa 250 m Durchmesser am Erdboden. Ein derartiger Cherenkovlichtblitz dauert nur wenige ns. Dieses Licht wird von den Spiegeln der Teleskope reflektiert und in der Kamera durch Lichtvervielfacher in elektrische Signale umgewandelt, welche dann per Computer gespeichert und ausgewertet werden. Abb. 3.1 zeigt den Nachweis des durch ein Gammaquant erzeugten Cherenkovlichtes. Liegt das Lichtkegelzentrum ausserhalb des Teleskops, so wird der Luftschaer als Ellipse in der Kameraebene abgebildet. Durch die verschiedenen Blickwinkel der Teleskope auf den Schaer ergibt sich in jeder Kamera ein anderes Bild. Durch Kombination der Bilder der Teleskope erfolgt eine genauere Positionsbestimmung als mit nur einem Teleskop. Die Unterscheidung der durch Gammaquanten erzeugten Schaer von den durch z.B. Protonen erzeugten, geschieht durch Vergleich mit Monte-Carlo-Simulationen und der Parametrisierung des Bildes.

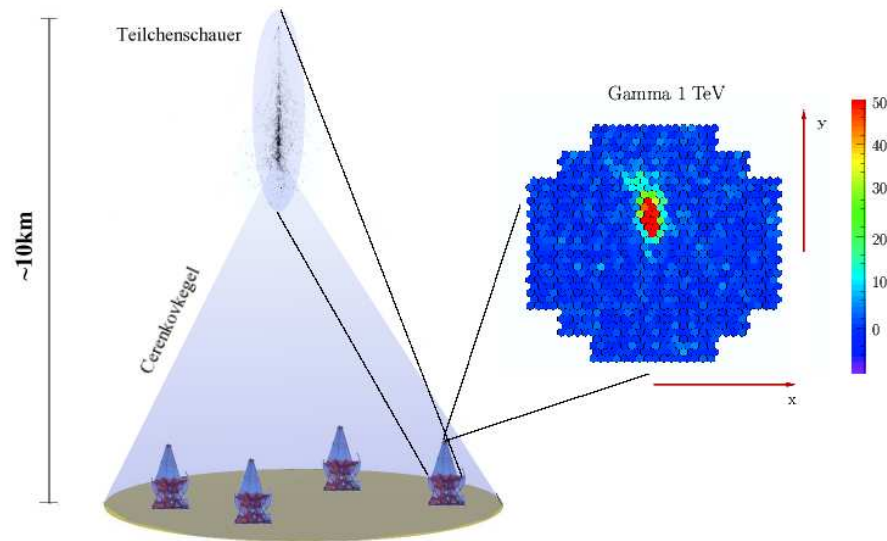


Abbildung 3.1: Erzeugung eines atmosphärischen Teilchenschauers durch ein Gammaquant. Die räumliche Ausdehnung des Schauers wird als eine Ellipse in der Kamera abgebildet.

3.2 Lage und Aufbau



Abbildung 3.2: Aunahme der H.E.S.S.-Systems im Hochland von Namibia

Als Nachfolger des erfolgreichen HEGRA Systems auf La Palma, des ersten stereoskopischen Aufbaus, begann der Bau des H.E.S.S.-Systems Anfang 2001. Es wurde entschieden, die Teleskope auf der südlichen Halbkugel zu positionieren, da hier das galaktische Zentrum über einen langen Zeitraum beobachtbar ist. Die Wahl des Standortes in der Nähe des Gamsberges in Namibia fiel aufgrund der sehr guten optischen Bedingungen. Das H.E.S.S.-System besteht aus 4 Teleskopen mit jeweils 12 m Durchmesser, s. Abb. 3.2. Diese sind in einem Quadrat mit einer Basislänge von 120 m angeordnet. Die Teleskope sind in einer Stahlbauweise mit Alt-Az-Montierung gebaut. Das Teleskop lagert auf einer Positionierschiene mit 12 m Durchmesser. Die Positioniergenauigkeit ist durch digitale und analoge

Wertgeber besser $10''$. Die Winkelauflösung der Teleskope ist momentan die Beste, die zur Gammaastronomie zur Verfügung steht. Die grosse Spiegelfläche von 107 m^2 pro Teleskop erlaubt einen sicheren Nachweis von Quellen in einem Bruchteil der bisher benötigten Zeit. Weiterhin wurden zahlreiche neue Quellen entdeckt. Die Nachweisgrenze liegt bei wenigen mCrab¹.

3.3 Der Spiegelträger

Aufgrund der geringen Intensität des Cherenkovlichtes ist eine grosse Spiegelfläche erforderlich, da die Empfindlichkeit mit der Spiegelfläche steigt. Bei einem Teleskopdurchmesser von knapp 12 m ist ein einzelner Spiegel nicht mehr kostengünstig herstellbar. Die gesamte Spiegelfläche von 107 m^2 setzt sich daher aus 382 Einzelspiegeln zusammen. Die Einzelspiegel sind auf einem Spiegelträger mit dem Krümmungsradius von 15 m montiert. Diese Anordnung der Spiegel wird als Davis-Cotton-Design bezeichnet. Der Aufbau hat den Vorteil einer guten Abbildung von nahen achsparallelen Strahlen. Ebenso werden Spiegel mit nur einer Brennweite benötigt, welche sich industriell in hohen Stückzahlen kostengünstig herstellen lassen. Jeder Spiegel ist durch 3 Punkte mit einem Stellmechanismus verbunden. Durch 2 Hubmotoren wird jeder Spiegel ausgerichtet, bis das Licht einer im Unendlichen befindliche Lichtquelle auf eine minimale Lichtfleckgrösse in der Kamera fokussiert wird. Die Grösse des Lichtflecks ist durch die Abbildungsqualität der Einzelspiegel und die Genauigkeit der Spiegelausrichtung begrenzt. In Abb. 3.3 ist die Anordnung der Spiegel auf einem Teleskop dargestellt.

3.4 Die Spiegel

Durch das Davis-Cotton-Design der Teleskope besitzen alle Spiegel eine Brennweite von 15 m und einen Durchmesser von 60 cm. Die Spiegel bestehen aus einem etwa 15 mm starkem Glaskörper, dessen Vorderseite mit einer reflektierenden Aluminiumschicht überzogen ist. Zur Versiegelung ist eine Quarzschicht aufgebracht. Diese widerstandsfähige Oberfläche soll verhindern, dass durch Umwelteinwirkungen die Aluminiumschicht zerstört wird und so die Reflektivität sinkt. Zur Qualitätskontrolle wurden alle Spiegel in Heidelberg auf ihre gerichtete Reflektivität und Abbildungsgüte überprüft. Die Spiegel wurden von 2 Firmen, COMPAS und GALAKTICA, geliefert. Ein Kriterium der Spiegelqualität ist, dass die Auflösung einen Wert von 1 mrad nicht überschreiten darf, dies bezeichnet den Bereich, in dem 80% des reflektierten Lichtes enthalten sind. Abb. 3.4 zeigt die Verteilung der Winkelauflösung der Spiegel beider Firmen.

Neben einer grossen Spiegelsammelfläche ist eine hohe gerichtete Reflektivität

¹Die Einheit mCrab bezieht sich auf den tausendsten Teil des Flusses der TeV-Gammastrahlung des Krebsnebels.



Abbildung 3.3: H.E.S.S. Teleskop mit vollständiger Spiegelmontierung

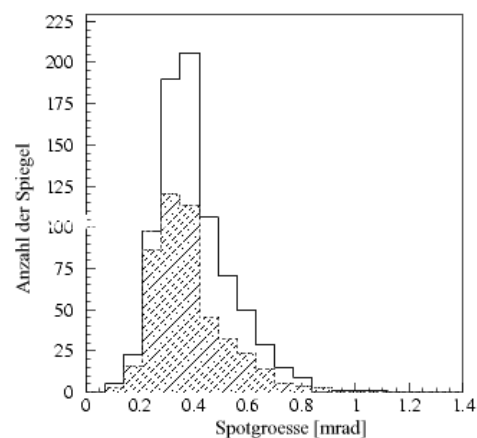


Abbildung 3.4: Verteilung der Spotgrössen, für die COMPAS Spiegel (durchgezogene Linie) und den Galaktica Spiegeln (schraffierte Fläche) bei 400 nm. Aufgetragen ist der Durchmesser des Kreises welcher 80% des reflektierten Lichtes enthält.

erwünscht, denn nur der gerichtete Anteil reflektiert das Cherenkovlicht in die Kamera. Nur Spiegel, deren gerichtete Reflektivität grösser 70% für 300 nm und 75% für den optischen Bereich grösser 400 nm war, wurden verwendet. Der Messaufbau zur Qualitätskontrolle wird im nächsten Kapitel beschrieben. Es zeigte sich, dass nur ein geringer Prozentteil der Spiegel in der Abbildungsqualität durchfielen. Grössere Schwankungen hingegen gab es bei der Reflektivität zu verzeichnen. Hier mussten 10% der Spiegel für eine Neualuminisierung zurückgeschickt

werden. Abb. 3.5 zeigt die Reflektivität als Funktion der Wellenlänge für COMPAS Spiegel. Diese Messungen wurden von COMPAS selber durchgeführt. Die Reflektivität ist für den Bereich zwischen 300 nm und 600 nm grösser 80%. Abb. 3.6 zeigt die Mittelwerte der Reflektivitäten der akzeptierten Spiegel. Die Verteilung der Reflektivitäten, aufgeschlüsselt nach Wellenlänge und Firma, ist in Abb. 3.7 dargestellt. Für 300 nm und 600 nm haben die Galaktica Spiegel im Durchschnitt eine höhere Reflektivität als die COMPAS Spiegel. Für 400 nm und 470 nm ist die Reflektivität der COMPAS Spiegel besser. Die Angabe der Reflektivitätswerte bezieht sich auf den Neuzustand der Spiegel. Aus Reflektivitätsmessungen an HEGRA Spiegeln und einzelnen H.E.S.S.-Spiegeln ist bekannt, dass die Reflektivität pro Jahr um 3%-4% sinkt.

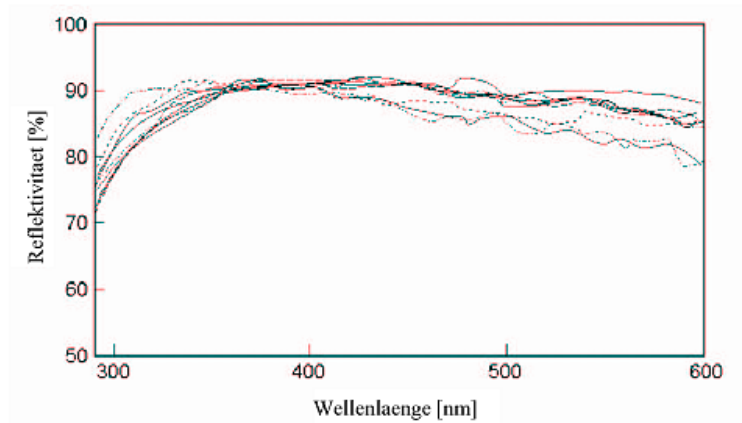


Abbildung 3.5: Reflektivität als Funktion der Wellenlänge, gemessen von COMPAS an typischen Spiegelproben, [2]

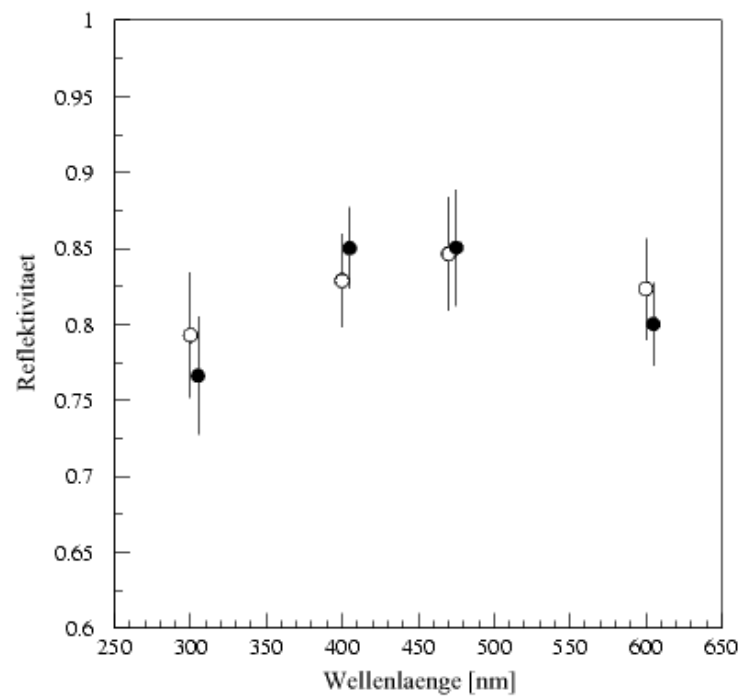


Abbildung 3.6: Durchschnittliche Reflektivität von akzeptierten Spiegeln, der COMPAS Spiegel (gefüllte Punkte) und Galactica Spiegel (Kreise). Die vertikalen Fehlerbalken zeigen die RMS Variation über alle Spiegelproben, [2]

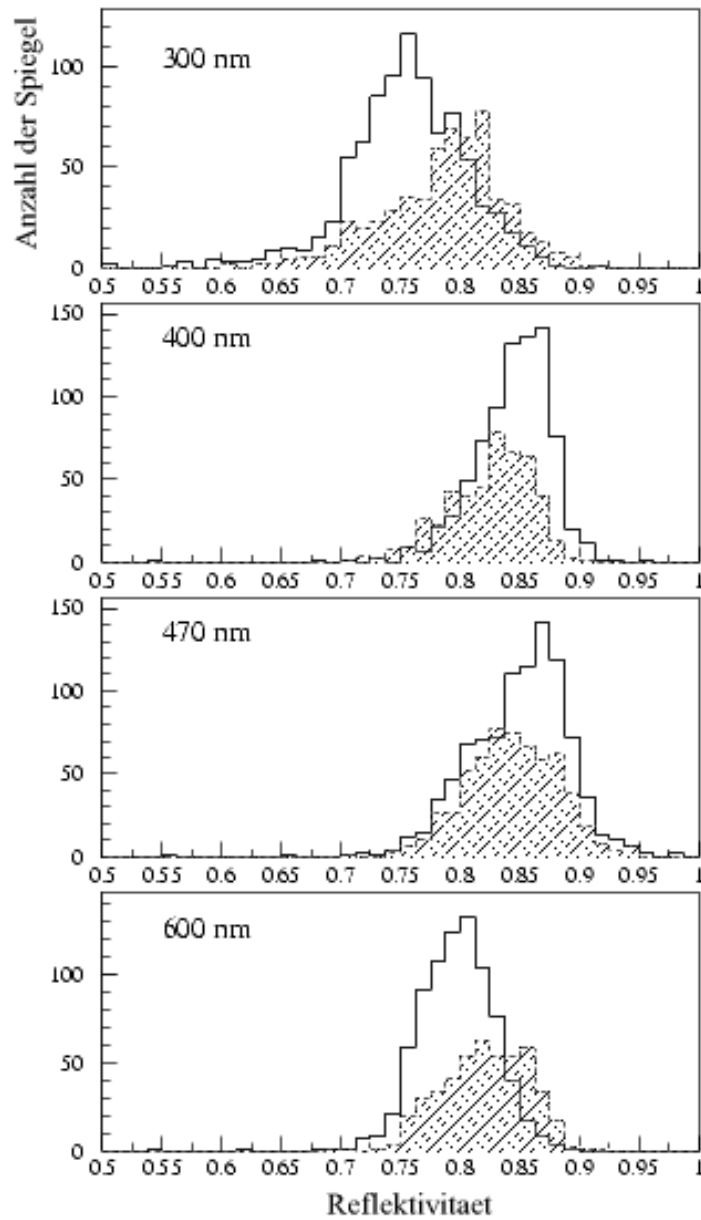


Abbildung 3.7: Verteilung der Reflektivitäten für 300 nm, 400 nm, 470 nm und 600 nm, der COMPAS Spiegel (Linie) und Galactica Spiegel (schraffierte Fläche). Enthalten sind alle Messungen, incl. der später zurück geschickten Spiegel. [2]

Kapitel 4

Reflektivitätsmessungen an Einzelspiegeln

Bei der Herstellung der Spiegel kommt es fertigungsbedingt zu Toleranzen bei der Reflektivität und der Abbildungsqualität. Da seitens der Hersteller keine nachträgliche Qualitätskontrolle durchgeführt wurde, musste ein Messaufbau realisiert werden, der die Spiegel in Reflektivität und Abbildungsgüte charakterisiert. So wurde verhindert, dass Spiegel, die nicht den Anforderungen entsprachen, auf den Teleskopen montiert wurden. Der Messaufbau sollte weitgehend automatisiert sein, die gerichtete Reflektivität sollte bei mehreren Wellenlängen bestimmt, sowie die Winkelauflösung gemessen werden. Diese Anforderungen wurden durch einen 2F-Messaufbau erfüllt, der in einer vorhergehenden Diplomarbeit[3] realisiert wurde. Das Verfahren hat den grossen Vorteil, dass keine kalibrierten Referenzgrössen wie Lichtquelle, Photodioden oder Spiegel bekannter Reflektivität benötigt werden.

4.1 Messprinzip des 2F-Verfahren

Für einen sphärischen Spiegel ist die Brennweite die Hälfte des Krümmungsradius des Spiegels. Wird eine Punktlichtquelle im doppelten Abstand der Brennweite aufgestellt, trifft das Licht stets senkrecht auf die Spiegeloberfläche und wird wieder in den Ursprung zurück reflektiert. Ist der Spiegel nicht ideal geformt, wird ein Lichtfleck abgebildet. Der im Folgenden beschriebene Aufbau wurde realisiert. Eine Halogenlampe beleuchtet homogen in der Entfernung der doppelten Brennweite, 30 m, den Spiegel. Neben der Lichtquelle befindet sich ein 3-Achs-Verfahrtisch, kurz Scantisch genannt, s. Abb. 4.1. Jede Achse wird durch einen Schrittmotor angetrieben. Die minimale Schrittweite ist 0.0125 mm. Die Ansteuerung erfolgt über die serielle Schnittstelle eines PCs. Eine auf einer Platte am Scantisch angebrachte Photodiode, Messdiode genannt, wandelt das vom Spiegel reflektierte Licht in einen Strom um, der durch ein Amperemeter gemessen und dann über eine serielle Schnittstelle des PCs ausgelesen wird. Abb. 4.1 zeigt den Messaufbau

wie er für die Messungen der H.E.S.S. Spiegel verwendet wurde. Vor der Photodiode ist ein Filterrad angebracht, welches die Selektion von 4 Wellenlängen, 600 nm, 470 nm, 400 nm, 300 nm, ermöglicht. Die Filter sind so gewählt, dass der Wellenlängenbereich des Cherenkov-Lichtes abgedeckt wird. Bevor mit der eigentlichen Messung begonnen wird, ist die Lichtintensität I_{ref} mit der Messdiode im direkten Lichtstrahl bei der Entfernung D zu messen. Damit ist bekannt, wie gross die Lichtintensität am Spiegel ist. Erst durch die Referenzmessung ist es möglich, die Intensität des reflektierten Lichtes mit der Intensität des abgeschickten Lichtes zu vergleichen. Nun wird die Messdiode auf dem Scantisch befestigt und der Lichtfleck wird in einem Raster mit definierter Schrittweite in horizontaler und vertikaler Richtung abgefahren und mit einer Photodiode die Intensität gemessen. Eine Kontrolldiode ist fest im direkten Lichtstrahl positioniert und misst ständig die Lichtintensität, so dass Schwankungen der Lichtleistung korrigiert werden. Ein Messprogramm übernimmt die Datenaufnahme sowie die Steuerung des Scantisches und des Filterrades.

Die gemessene Gesamtintensität ist die Summe aller Messwerte multipliziert mit einem Skalierungsfaktor.

$$I_{meas} = \sum I_i \cdot \frac{1}{s^2} \quad (4.1)$$

Der Skalierungsfaktor $\frac{1}{s^2}$ korrigiert, dass das Quadrat der Rasterschrittweite s nicht mit der Diodenfläche von 1 cm^2 übereinstimmen muss. Ist die Schrittweite z.B. grösser als 1 cm , würde sich eine zu geringe Gesamtintensität ergeben.

Durch die gemessene Referenzintensität lässt sich die erwartete Gesamtintensität berechnen, wenn der Spiegel 100% des Lichtes reflektieren würde.

$$I_{exp} = I_{ref} \cdot A \cdot \frac{D^2}{(30 \text{ m})^2} \quad (4.2)$$

Als Sammelfläche gilt die Spiegelfläche A . Der Faktor $D^2/(30 \text{ m})^2$ berücksichtigt, dass die Lichtintensität mit dem Abstandsquadrat zur Lichtquelle absinkt und die Intensität am Spiegel um diesen Faktor kleiner ist als in der Entfernung D zur Lichtquelle. Der Quotient aus gemessener zu erwarteter Gesamtintensität ergibt den gerichteten Reflektivitätswert.

$$R = \frac{I_{meas}}{I_{exp}} \quad (4.3)$$

Das Mass der Abbildungsgüte ist die Lichtfleckgrösse, welche ausgehend vom Lichtfleckschwerpunkt 80% des reflektierten Lichtes enthält, angegeben in mrad. Der Fehler der gemessenen Werte beträgt 3%.

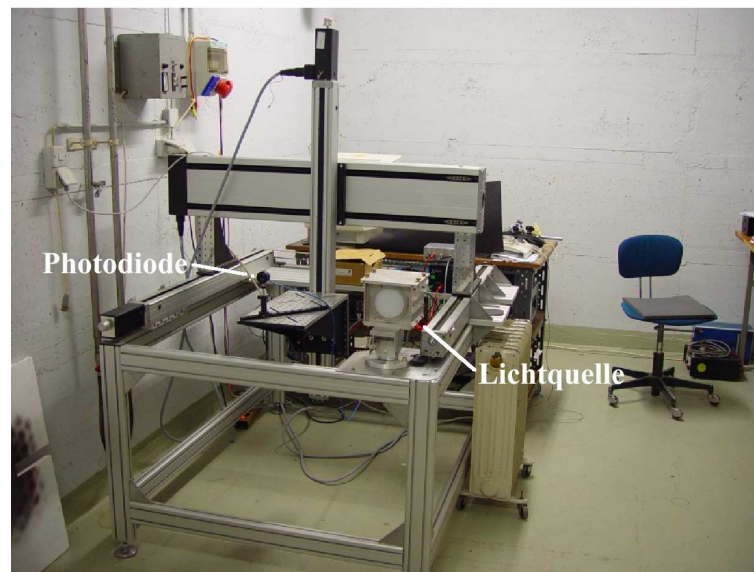


Abbildung 4.1: Messaufbau im Keller des MPIK Beschleunigergebäudes. Der Tisch kann in allen 3 Richtungen verfahren werden. Auf einer angeschraubten Platte befindet sich die Photodiode. Rechts am Tisch ist eine Lichtquelle montiert.

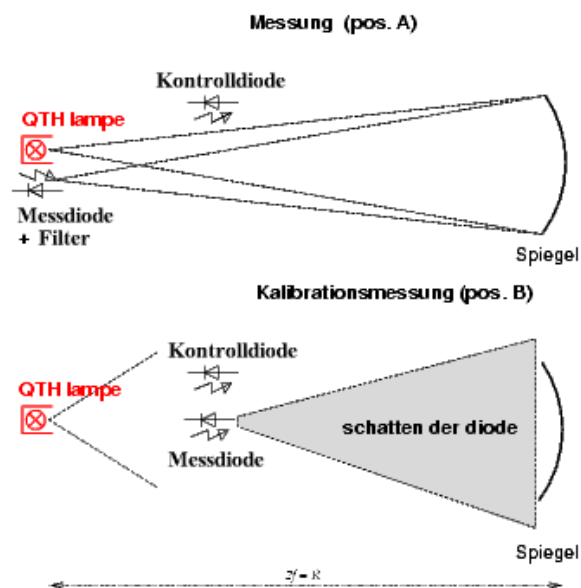


Abbildung 4.2: Das obere Teil des Bildes zeigt den Aufbau während des Abtastprozesses. Der untere Teil stellt die Kalibration der beiden Dioden dar. S. Diplomarbeit Sami Elfahem[3]

4.2 Erweiterung für Tageslichtmessungen

Die gesamte Vermessung der Einzelspiegel erfolgte in einem abdunkelbaren Raum, um die Messung der Lichtintensität nicht durch Streulicht zu verfälschen. Aus

zwei Gründen musste diese Einschränkung für zukünftige Spiegelmessungen aufgehoben werden.

1.) In einer 2. Ausbauphase des H.E.S.S.-Systems ist ein grosses Einzelteleskop mit einer Fokallänge von 35 m geplant. Die Vermessung der Spiegel mit dem 2F-Messverfahren fordert einen Abstand von 70 m zwischen Lichtquelle und Spiegel. Mit dem vorhandenen 2F-Messaufbau wäre eine Vermessung von Spiegeln mit einer Brennweite von $F=35$ m nicht möglich, da am Institut kein abdunkelbarer Raum mit einer minimalen Länge von 70 m vorhanden ist.

2.) Im Hinblick auf spätere Reflektivitätsmessungen der Teleskope ist eine Messung bei Tageslicht wünschenswert, da sonst wertvolle Messzeit bei Nacht verloren gehen würde.

Der 2F-Messaufbau musste daher erweitert werden, um Messungen bei Streulicht durchführen zu können. Der einfachste Ansatz besteht darin, eine Untergrundmessung des Streulichtes ohne Lichtquelle durchzuführen. Die Untergrundintensität wird von der gemessenen Intensität mit Lichtquelle subtrahiert. Das Ergebnis ist die Intensität, die nur durch die Lichtquelle gegeben ist. Der Fehler in der Reflektivitätsbestimmung ist aber zu gross, da die Intensität des Streulichtes über die Dauer einer Reflektivitätsmessung variieren kann.

Ein Verfahren, welches unabhängig von der Lichtintensität des Streulichtes ist, setzt eine gepulste Lichtquelle voraus. Die gemessene Lichtintensität ist die Summe aus Streulichtsignal und gepulstem Lichtsignal. Durch einen elektronischen Standard-Bandpassfilter, der auf die Frequenz der gepulsten Lichtquelle abgestimmt ist, wird das Streulichtsignal geblockt. Jedoch wird nicht das gesamte Streulicht herausgefiltert, da der Bandpassfilter keine scharfe Filterfrequenz besitzt, sondern einen Frequenzbereich durchlässt. Selbst ein sehr guter Bandpassfilter lässt bei einer Filterfrequenz von 1000 Hz einen Bereich von 10 Hz durch. Es würde immer auch ein Teil des Streulichtes gemessen werden, der zu einem Fehler in der Reflektivitätsbestimmung führt. Der Bandpassfilter muss also so schmalbandig wie möglich gemacht werden. Lock-In Verstärkern können Frequenzen mit einem Bereich von 0.01 Hz filtern. Die Funktionsweise des Lock-In Verstärkers wird im folgenden Kapitel eingegangen.

4.2.1 Funktionsweise eines Lock-In Verstärkers

Lock-In Verstärker wurden entwickelt, um Analogsignale bis in den Bereich von μA bzw. nV zu messen, bei dem das Untergrundsignal einen Faktor von mehreren 1000 grösser als das eigentliche Nutzsignal sein kann. Als Voraussetzung muss das Nutzsignal, im 2F-Messaufbau das Licht der Halogenlampe, in periodischer Form eines Sinus- oder TTL-Signals vorliegen. Wie das Licht gepulst wird, ist im nächsten Kapitel erklärt.

Der Lock-In Verstärker verfügt über zwei Eingänge. An einem Eingang liegt das

Stromsignal der Photodiode, an dem zweiten Eingang das periodische Spannungssignal, genannt Referenzsignal, welches genau mit Frequenz und Phase des gepulsten Lichtes übereinstimmt. Für die Messung des Nutzsignals nutzt der Lock-In Verstärker eine sog. phasensensitive Detektion. Das Eingangssignal wird mit dem Referenzsignal multipliziert, mit der Bedingung, dass zwischen beiden Signalen eine feste Phasenbeziehung besteht (s. Abb. 4.3). Die folgende mathematische Betrachtung zeigt, dass durch diese Multiplikation ein Signal gemessen wird, das nur mit der Referenzfrequenz übereinstimmt und dass der Ausgang ein zum Eingangssignal proportionales Gleichspannungssignal liefert. Alle Signale, deren Frequenz sich von der Referenzfrequenz unterscheiden, werden unterdrückt. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit, auch noch sehr kleine Signale zu messen.

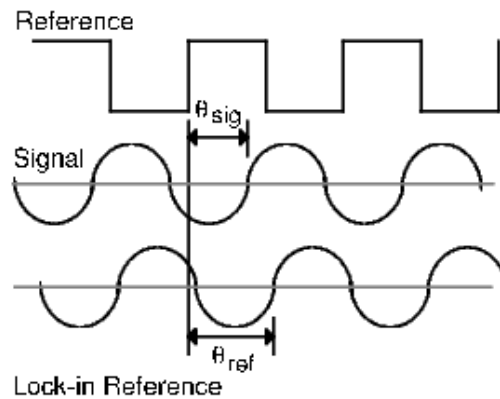


Abbildung 4.3: Schema der phasensensitiven Detektion. Der Lock-In generiert eine interne Referenz, untere Welle, mit derselben Frequenz der Eingangsreferenz, obere Welle, aber einer möglichen Phasenverschiebung θ_{ref} . Das zu messende Signal hat dieselbe Frequenz aber mit einer anderen Phasenverschiebung θ_{sig} .

Das Nutzsignal folgt einer periodischen Modulation

$$V_{sig} \sin(\omega_r t + \theta_{sig})$$

Das Lock-In Referenzsignal ist ein periodisches Signal

$$V_L \sin(\omega_L t + \theta_{ref})$$

Das Nutzsignal wird intern verstärkt und mit dem Referenzsignal multipliziert.

$$\begin{aligned} V_{psd} &= V_{sig} V_L (\sin(\omega_r t + \theta_{sig}) \sin(\omega_L t + \theta_{ref})) \\ &= 1/2 V_{sig} V_L \cos([\omega_r - \omega_L]t + \theta_{sig} - \theta_{ref}) \\ &\quad - 1/2 V_{sig} V_L \cos([\omega_r + \omega_L]t + \theta_{sig} + \theta_{ref}) \end{aligned}$$

Ist $\omega_r = \omega_L$ dann hängt das Ergebnis nur von der Phasenbeziehung zwischen beiden Signalen ab. Dieses Signal wird durch einen Tiefpass gefiltert, wodurch der zweite Term der oberen Gleichung wegfällt. Das Endergebnis ist ein Gleichspannungssignal welches proportional zur eingehenden Signalamplitude ist.

$$V_{psd} = 1/2V_{sig}V_L\cos(\theta_{sig} - \theta_{ref})$$

Ein Problem tritt auf wenn die Phasendifferenz $\theta = \theta_{sig} - \theta_{ref}$ gerade 90° ist. Es ist dann nicht mehr möglich, ein Signal zu messen. Um diesen Fall zu vermeiden, wird das Eingangssignal kopiert und mit einem um 90° phasenverschobenen Referenzsignal multipliziert. Dafür erhält man

$$V_{psd2} = 1/2V_{sig}V_L\sin(\theta_{sig} - \theta_{ref})$$

Ein Ausgang ist nun proportional zu $\sin(\theta)$, der Andere zu $\cos(\theta)$. Fasst man beide Signale zusammen wird, ist das Ausgangssignal phasenunabhängig.

$$X = V_{sig}\sin(\theta)$$

$$Y = V_{sig}\cos(\theta)$$

$$\boxed{V_{out} = (X^2 + Y^2)^2} \quad \boxed{\tan(\theta)^{-1} = (Y/X)} \quad (4.4)$$

V_{out} entspricht dann dem zu messenden Nutzsignal.

4.2.2 Optischer Pulsformer und Rausch-Signal-Verhältnis

In der obigen Herleitung wurde gezeigt, dass der Lock-In Verstärker den gepulsten Photostrom vom Streulicht trennen kann. Es wurde aber noch keine Aussage gemacht, wie gross das Rauschsignal werden darf, damit das Nutzsignal noch messbar ist. Im Folgenden wird gezeigt, wie eine quantitative Aussage möglich ist.

Das erforderliche gepulste Licht wird durch einen optischen Pulsformer erzeugt. Der optische Pulsformer SR540 der Firma Stanford Research Systems besteht aus einer geschlitzten Scheibe, welche auf einer Motorachse befestigt ist. Über zwei unterschiedliche Schlitz-Blätter kann der Frequenzbereich von 4 Hz bis 3.7 kHz abgedeckt werden. Jedes Blatt liefert zwei unterschiedliche Schlitzreihen, s. Abb. 4.4. An der Kontrolleinheit wird die Pulsfrequenz eingestellt und per BNC Kabel an den Referenzeingang des Lock-In gelegt.

Um mit dem Lock-In Verstärker nun Signale messen zu wollen müssen zwei Dinge beachtet werden. Der maximale Eingangsstrom darf unter keinen Umständen

10 mA überschreiten. Aber auch der Technik des Lock-In Verstärkers sind Grenzen gesetzt. Für sehr kleine Lichtintensitäten kann das elektronische Rauschen das Nutzsignal überlagern.

Um welchen Faktor die Streulichtintensität grösser als die gepulste Lichtintensität sein kann und das gepulste Licht noch messbar ist, ergibt sich aus der Angabe des maximalen Rausch-Signal-Verhältnis. Das maximale Rausch-Signal-Verhältnis ist definiert als der Quotient aus Streulichtintensität und minimaler messbarer gepulster Intensität.

Für die Messung dieses Faktors wurde direkt vor der Halogenlampe ein optischer Pulsformer angebracht und das Amperemeter der Photodiode durch den Lock-In Verstärker SR830 der Firma Stanford Research Systems ersetzt. Die Messdiode

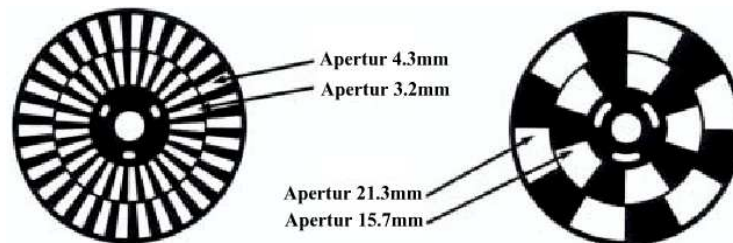


Abbildung 4.4: Darstellung der verwendeten Schlitzscheiben. Der Gesamtdurchmesser beträgt 10 cm. Mit der 30-Loch Schlitzscheibe wird von 400 Hz bis 3.7 kHz, mit der 6-Loch Schlitzscheibe von 4 Hz bis 400 Hz, Licht gepulst.

befand sich 1 m vor der Halogenlampe. Die Intensität des Streulichtes, welches durch Deckenlampen erzeugt wird, wurde ohne Halogenlicht mit dem Amperemeter gemessen. Die Halogenlampe und optischer Pulsformer wurden eingeschaltet und die Intensität der Halogenlampe verringert bis der Lock-In keine feste Phasenbeziehung mehr herstellen konnte. Die Messungen wurden für einen Frequenzbereich von 100 Hz bis 2800 Hz durchgeführt. In einer zweiten Messreihe wurden Halogenlampe und Photodiode in einer Halle aufgebaut. Das Streulicht war hier durch das Sonnenlicht gegeben, s. Abb. 4.5. Es zeigte sich, dass bei beiden Messreihen Frequenzen unter 120 Hz ein Rausch-Signal-Verhältnis geringer als 100 aufwiesen. Bei den Leuchtstoffröhren hatten Harmonische von 50 Hz einen sehr geringen Wert, was auf ein Flackern der Leuchtstoffröhren zurückzuführen ist. Unter 400 Hz hatten 2 Frequenzen, 270 Hz und 360 Hz, ein grosses maximales Rausch-Signal-Verhältnis von mehr als 700. Für Frequenzen grösser 500 Hz gibt es ein Maximum bei etwa 650 Hz. Danach sinkt das maximale Rausch-Signal-Verhältnis wieder. Bei Sonnenlicht und Frequenzen grösser 500 Hz, schwankte das maximale Rausch-Signal-Verhältnis nur noch geringfügig und verblieb auf einem hohen Niveau von über 100000. Das Rausch-Signal-Verhältnis ist für die Leuchtstoffröhren bis um einen Faktor 100 geringer als für Sonnenlicht. Durch die bauartbedingte Lichterzeugung kommt es zu einem Flackern über den gesamten Frequenzbereich,

das damit bei kleinen gepulsten Lichtintensitäten das eigentliche Signal überlagert und eine Messung verhindert. Der Fehler im max. Rausch-Signal-Verhältnis liegt im Mittel zwischen 10% bis 20%, da das Messsignal an der Messschwelle sehr stark schwankte.

Für die Spiegelmessungen war die Wahl der Pulsfrequenz jedoch eingeschränkt, da nur mit der 6-Loch Schlitzscheibe der Spiegel homogen ausgeleuchtet wird. Es wurde mit einer Frequenz von 270 Hz gearbeitet, da für diese Frequenz das maximale Rausch-Signal-Verhältnis sehr gross ist.

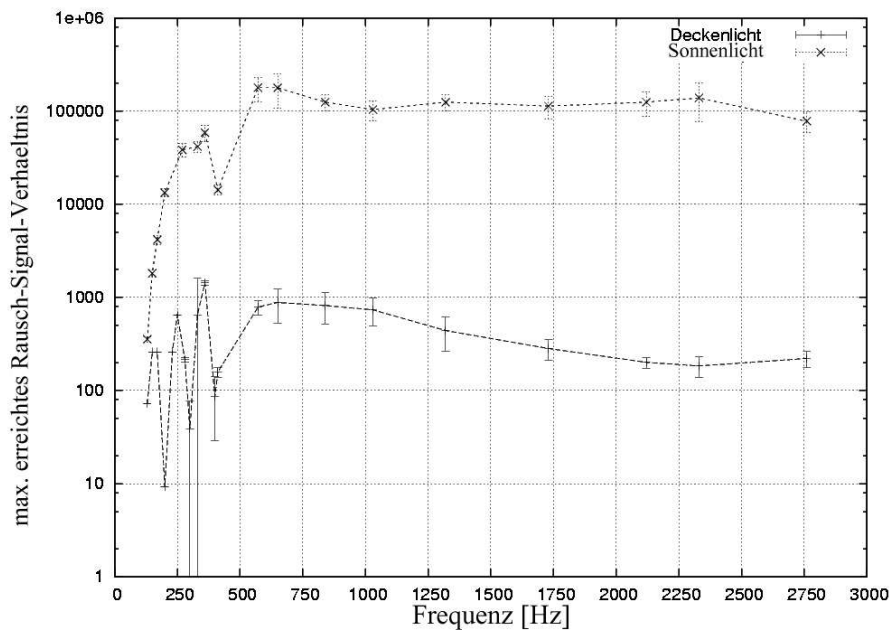


Abbildung 4.5: max. Rausch-Signal-Verhältnis bei angeschalteter Deckenbeleuchtung (Leuchtstofflampen), untere Kurve, und Sonnenlicht, obere Kurve

4.2.3 Strom-Spannungs-Wandler

Für die 2F-Messungen wurden die Lichtintensitäten der Messdiode und der Kontrolldiode gleichzeitig durch das Amperemeter ausgelesen. Das Amperemeter besitzt dafür 2 separate BNC Eingänge. Der Lock-In Verstärker hingegen besitzt nur einen Eingangskanal, so dass immer nur der Strom einer Photodiode gemessen werden kann. Es musste ein elektronischer Schalter realisiert werden, der Eingänge für beide Photodioden besitzt und am Ausgang zwischen Messdiode und Kontrolldiode schaltet. Um den Photodiodenstrom direkt zu schalten wäre eine komplizierte elektronische Schaltung notwendig, vor allem da es sich um sehr kleine Ströme bis zu wenigen pA handelt.

Der Lock-In Verstärker kann nicht nur Stromsignale, sondern auch Spannungssignale

messen. Der Vorteil ist, dass Spannungssignale durch Standardelektronik geschaltet werden können. Dazu müssen die Photoströme in Spannungen umgewandelt werden. Es wurde eine elektronische Schaltung aufgebaut, in der durch zwei Operationsverstärker die Photoströme von Mess- und Kontrolldioden in eine Spannung umgewandelt und gleichzeitig verstärkt werden. Der Verstärkungsfaktor ist der Quotient aus Spannungs- und Stromamplitude. Die Spannungssignale der beiden Operationsverstärker werden an die Eingänge eines CMOS-Schalters geleitet. Durch eine Steuerspannung von 0 V oder 5 V wird am Ausgang zwischen beiden Dioden geschaltet werden. Die Umschaltzeit beträgt 0.2 ms. Den Bau des Strom-Spannungs-Wandlers, kurz SSW, inklusive Schalterchip übernahm die Elektronikabteilung.

Zur Funktionsprüfung wurde der SSW zwischen die Photodioden und den Lock-In Verstärker geschaltet. Die Messdiode und die Kontrolldiode befanden sich im direkten Lichtstrahl der Halogenlampe. Durch Regeln der Steuerspannung ließ sich zwischen beiden Dioden hin- und hergeschaltet. Es stellte sich jedoch heraus, dass der Lock-In nicht für das schnelle Umschalten zwischen Signalen geeignet ist. Wird zwischen den Photodioden umgeschaltet, so wird etwa 1 s benötigt um das Signal zu synchronisieren. Das heisst, eine mögliche Schwankung der Lichtintensität der Halogenlampe kann durch die Kontrolldiode nicht mehr korrigiert werden, da die Messung der Messdiode im Lichtfleck und der Kontrolldiode nicht zum selben Zeitpunkt stattfinden.

Ob die Kontrolldiode überhaupt benötigt wird, d.h. die Lichtquelle driftet oder die Lichtleistung zeitlich stark variiert, konnte durch eine Langzeitmessung der Lichtintensität der Halogenlampe überprüft werden. Die Kontrolldiode wurde in den direkten Lichtstrahl gestellt und über einen Zeitraum von 20 min der Photostrom mit dem Lock-In Verstärker gemessen. Aus Abb. 4.6 ist ersichtlich, dass die Lichtleistung der Halogenlampe auf einer Zeitskala von 20 min nur um 0.3% schwankt, aber keine Drift zeigt. Da diese geringe Schwankung vernachlässigt werden kann und keine Korrektur durch eine Kontrolldiode nötig ist, wurde für die Reflektivitätsbestimmung von Einzelspiegeln nur mit einer Messdiode, ohne Strom-Spannungs-Wandler gemessen. Für die Messungen von Einzelspiegeln wird der SSW zwar nicht gebraucht, bei der Signalübertragung mit der 20F-Methode, s. Kap.5.2.3, wird die Nutzung des SSW aber unumgänglich.

4.2.4 LED als weitere Lichtquelle

Die verwendete Halogenlampe produziert sehr viel Wärme. Durch das breite emittierte Spektrum werden Filter benötigt um Wellenlängen zu selektieren. In vielen Anwendungen werden herkömmliche Glühlampen durch leistungsfähige LED ersetzt. Die LED haben den Vorteil, dass sie sehr kompakt sind, wenig Strom benötigen, kaum Wärme abgeben und in einem schmalen Spektralbereich emittieren. Die LED können kontinuierlich oder gepulst betrieben werden. Durch die kurze Anstiegszeit bis zur maximalen Lichtintensität sind Pulsfrequenzen bis in den kHz-Bereich möglich. Für Pulsfrequenzen im kHz-Bereich mit Lock-In

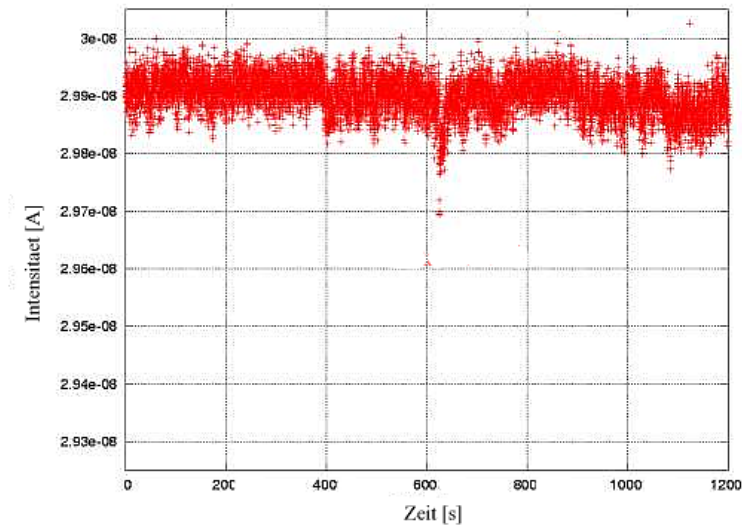


Abbildung 4.6: Lichtleistung der Halogenlampe über einen Zeitraum von 20 min. Die Halogenlampe zeigt keine Drift. Die Schwankung beträgt 0.3%.

Verstärker ergeben sich sehr hohe max. Rausch-Signal-Verhältnisse, s. Abb. 4.4. Die Lebensdauer liegt mit über 100000 h weit über den 50 h der Halogenlampe. Durch die Anzahl der Vorteile kam eine LED Lampe als eine zweite Lichtquelle in Frage.

Die weltweit hellsten LED kommen von der Firma LUXEON,USA. Für die LED-Lichtquelle wurden LED mit einer Leistung von 3 W und einem spektralen Maximum von 470 nm(blau), 530 nm(grün) verbaut. Eine weitere weisse LED emittiert Licht, dass einer Farbtemperatur¹ von 5500 K entspricht. Die Halbwertsbreite² des emittierten Spektralbereiches der blauen und grünen LED beträgt (25-30) nm.

Abb. 4.7 zeigt im linken Diagramm die relative spektrale Leistungsverteilung der erhältlichen LEDs als Funktion der Wellenlänge. Der rechte Teil der Abb.4.7 zeigt die relative Intensität in Abhängigkeit des Abstrahlwinkels. Für einen Winkelbereich von $\pm 5^\circ$ bei 0° ist das Lichtfeld auf 2%-3% homogen. Abb. 4.8 zeigt die relative spektrale Leistungsverteilung der weissen LED. Die Homogenität des Lichtfeldes ist in Abb. 4.7 (rechts) dargestellt.

Die Ansteuerung der LED erfolgt über einen von der Elektronikabteilung entwickelten Treiber, der einen gepulsten Strom von 1 A liefert. Das Pulsersignal wird direkt vom Lock-In Verstärker oder durch einen Frequenzgenerator erzeugt. Leider liegt der Hauptanwendungsbereich dieser lichtemittierenden Dioden im optischen Bereich,

¹Die Farbtemperatur charakterisiert die spektrale Zusammensetzung des Lichts, den ein (idealisierter) schwarzer Koeper bei einer bestimmten Temperatur aussendet.

²Die Halbwertsbreite gibt die in Wellenlängeneinheiten gemessene volle Breite an, bei der die Intensität auf 50% des Maximalwertes abgesunken ist.

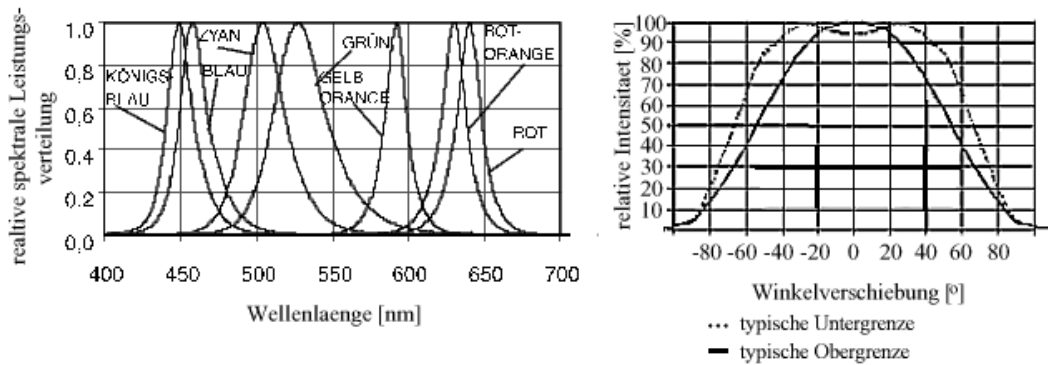


Abbildung 4.7: Darstellung der spektralen Leistungsverteilungen der LED, links, und Lichthomogenität in Abhängigkeit der Winkelverschiebung, rechts, [4]

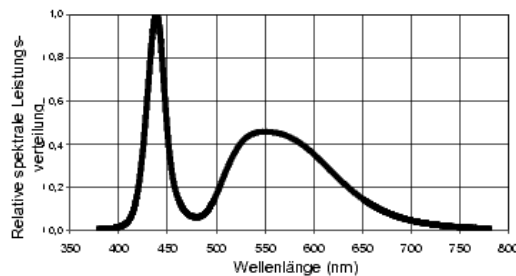


Abbildung 4.8: Darstellung der spektralen Leistungsverteilung der weissen LED, [4]

so dass es keine vergleichsweise leistungsstarken UV-LED gab. Eine Suche bei anderen Herstellern blieb erfolglos. Um eine gute Wärmeabfuhr zu gewährleisten, wurden die LED auf einen Aluminiumkühlkörper mit Wärmeleitpaste aufgebracht. Der Kühlkörper erwärmt sich aber nur um wenige Kelvin. Die LED sollten so keine Leistungsdrift zeigen und nach dem Umschalten zwischen den LED schnell eine konstante Lichtleistung abgeben. Die Lichtintensität der 470 nm LED ist um mehr als einen Faktor 2 grösser als die der Halogenlampe mit 470 nm Filter. Abb. 4.9 zeigt die Intensitäten der LED über einen Zeitraum von 20 min. Innerhalb von 20 s nach dem Einschaltvorgang wird eine konstante Lichtleistung erreicht. Die weiße LED zeigte eine Drift zu höheren Intensitäten, die nach 90 min konstant wird. Die Intensität stieg um 1,5%. Die LED mit 470 nm und 530 nm zeigen keine Drift.

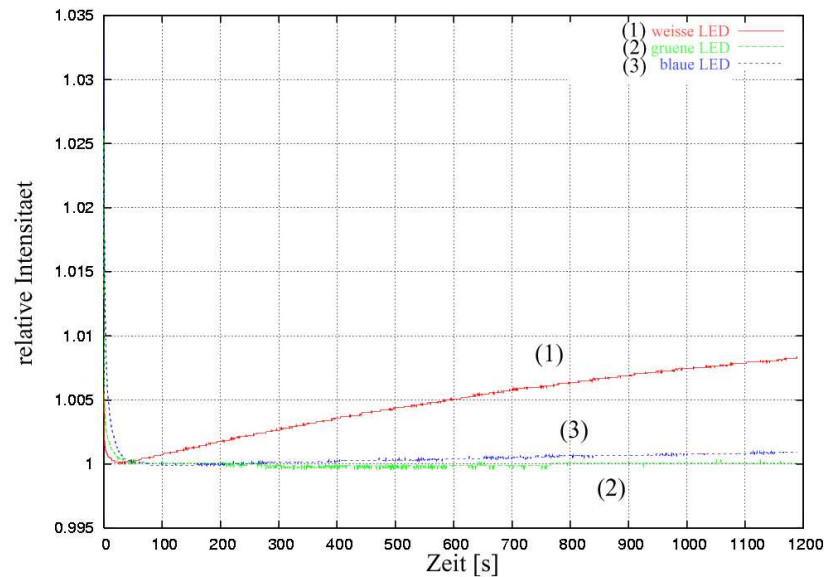


Abbildung 4.9: Einschaltverhalten der LED. Nach einer Zeit von 20 s erreichen die LED eine konstante Endleistung. Die grüne(2) und blaue(3) LED bleiben stabil, die weisse(1) LED zeigt eine leichte Drift zu mehr Leistung, erreicht aber nach 90 min ebenso eine stabile Leistung.

4.3 Spiegelmessungen

4.3.1 Lichtfeldmessung und Einzelspiegel

Durch die Verwendung des optischen Pulsformers ist es möglich, dass durch eine zu geringe Schlitzbreite der Spiegel nicht homogen ausgeleuchtet wird. Um sicher zu gehen wurde auch überprüft, dass die Lichtintensität mit dem Abstandsquadrat zur Halogenlampe abfällt.

Für die Lichtfeldmessungen wurde die Halogenlampe umgestellt, so dass die Messdiode auf dem Scantisch direkt beleuchtet wird. Das Lichtfeld wurde mit einer Schrittweite von 10 mm mit dem Scantisch abgefahren und die Intensität gemessen. Es ergibt sich eine radialsymmetrische Verteilung, s. Abb. 4.10. Wird die Intensitätsverteilung auf eine Spiegelentfernung von 30 m skaliert, sinkt die Intensität in einem Radius von 1.5 m um 3% der maximalen Lichtintensität.

Weiterhin wurde gemessen ob die Intensität des Lichtes mit dem Abstandsquadrat abfällt. Auf einer Stahlschiene mit Maßeinteilung wurden Lichtquelle und Photodiode befestigt. Die Messdiode befand sich immer im homogenen Teil des Lichtfeldes. Der Abstand wurde zwischen 50 cm und 200 cm variiert. Die Abnahme der Intensität mit dem Abstand ist in Abb. 4.11 gezeigt. An die Messpunkte wurde eine Funktion angepasst die proportional dem Abstandsquadrat ist. Innerhalb der Messgenauigkeit der Lichtintensität und Abstandsmessung stimmen Ausgleichskurve und Messpunkte überein. Mit diesen beiden Messungen wurde gezeigt, dass der

Spiegel homogen ausleuchtet wird und die Lichtintensität mit dem Abstandsquadrat zur Lichtquelle abfällt.

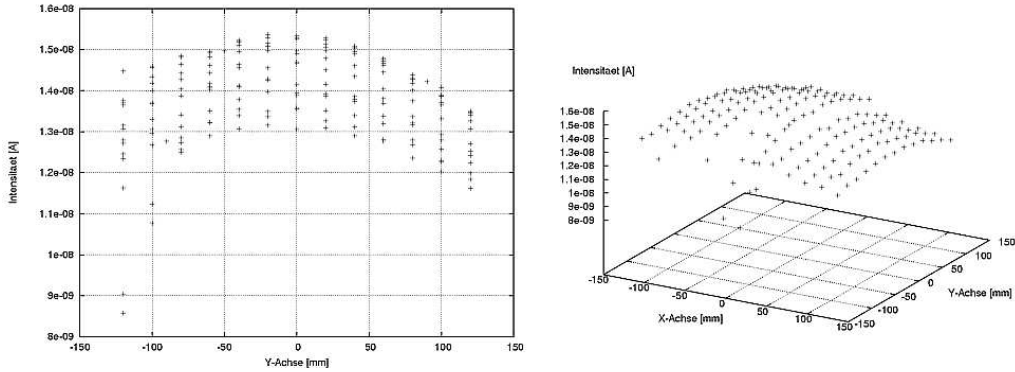


Abbildung 4.10: Lichtfeld in 1 m Entfernung zum Lichtzerhacker und Halogenlampe. Innerhalb eines Radius von 50 mm sinkt die Intensität um 3%.

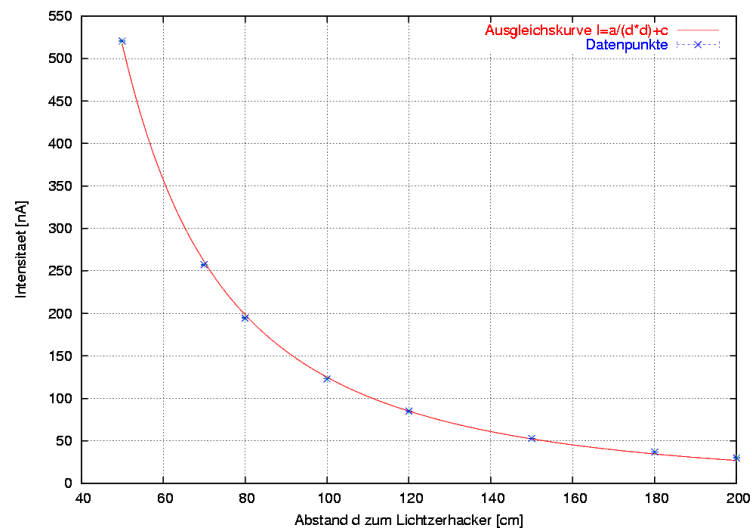


Abbildung 4.11: Abnahme der Intensität mit dem Quadrat des Abstandes zur Lichtquelle. Die durchgezogene Kurve ist eine Ausgleichskurve durch die dargestellten Messpunkte. Die Fehlerbalken liegen innerhalb der Punktgröße.

Die Ergebnisse der oben beschriebenen Tests zeigten, dass die Verwendung eines Lock-In Verstärkers und des optischen Pulsformers keinen Einfluss auf die Bestimmung der Reflektivität und Winkelauflösung eines Spiegels haben sollten. Nach der Anpassung des Messprogramms an den Lock-In wurde die Reflektivität und die Winkelauflösung eines H.E.S.S.-Spiegels sowohl mit dem Amperemeter als auch mit dem Lock-In Verstärker bestimmt. Für den Lock-In Verstärker wurde die Messung einmal mit und einmal ohne Streulichtbeleuchtung durchgeführt. Die Messung mit Amperemeter fand im abgedunkelten Raum statt. Die Messergebnisse sind in Tabelle 4.1 aufgelistet. Die ermittelten Reflektivitätswerte stimmen innerhalb des Fehlers von 3% miteinander überein. Mit dem Lock-In Verstärker ist es also möglich, Einzelspiegelmessungen bei hoher Streulichtintensität durchzuführen.

	Filter	300nm	400nm	470nm	600nm
1	R [%]/ W [mrad]	[79.4]/[0.4]	[79.6]/[0.4]	[84]/[0.33]	[86]/[0.33]
2	R [%]/ W [mrad]	[78.4]/[0.4]	[79]/[0.4]	[84.7]/[0.33]	[82.7]/[0.33]
3	R [%]/ W [mrad]	[78.2]/[0.3]	[79.1]/[0.4]	[84.8]/[0.3]	[83]/[0.3]

Tabelle 4.1: R: Reflektivität, W: Winkelauflösung. Ergebnisse der Vergleichsmessungen mit 1) Amperemeter 2) Lock-In mit Streulicht 3) Lock-In ohne Streulicht. Innerhalb der Messfehler von 3% für die Reflektivität stimmen die Werte überein.

4.3.2 Rauschunterdrückung

Bei den Spiegelmessungen mit dem Lock-In Verstärker und Streulicht spielte Rauschen bisher keine Rolle, da die Lichtintensität im Lichtfleck stets über dem noch minimal zu messendem Signal von 10 pA lag. Ebenso war das Streulicht nicht intensiv genug, als dass das max. Rausch-Signal-Verhältnis zu gering war. Für Messungen bei Tageslicht muss dies aber nicht weiter gelten. Es musste daher die Frage geklärt werden, wie entschieden werden kann, wann ein gemessener Wert einer Lichtintensität oder dem Rauschen entspricht. Anhand des Phasenwertes θ kann diese Frage beantwortet werden.

Aus den max. Rausch-Signal-Verhältnis Messungen war bekannt, dass für Phasenwerte $\theta > 45^\circ$ und $\theta < -45^\circ$ im Allgemeinen kein Signal mehr messbar war. Diese Aussage wird bekräftigt wenn man sich die Phasenverteilung eines gemessenen Lichtflecks anschaut. Innerhalb des Lichtflecks sind die Phasenwerte stark um 0° lokalisiert, wohingegen der Bereich ausserhalb ohne Licht eine zufällige Phasenverteilung aufweist, mit einer Häufung bei positiven Phasenwerten, s. Abb. 4.12. Man führt eine Phasenbegrenzung ein, so dass nur Intensitätswerte zur Analyse benutzt werden, deren Phasenwerte innerhalb dieser Grenze liegen. Die Intensitätswerte deren Phasenwerte ausserhalb der Begrenzung liegen, werden als Rauschen gewertet und nicht beachtet.

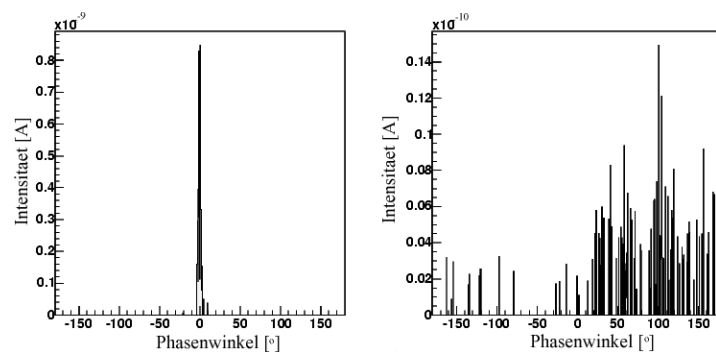


Abbildung 4.12: links: Phasenverteilung im Lichtfleck, rechts: Phasenverteilung ausserhalb des Lichtflecks

Wie gut die Rauschunterdrückung durch die Phasenbegrenzung ist, kann überprüft werden, wenn man die Lichtintensität so weit verringert, bis die Rauschamplitude ausserhalb des Lichtflecks nicht mehr vernachlässigbar ist gegen die Signalamplitude im Lichtfleck und damit ohne eine Phasenbegrenzung falsche Reflektivitätswerte bestimmt werden. Die Reflektivitäten können nun mit und ohne Phasenbegrenzung berechnet und verglichen werden. Es wurden Reflektivitätsmessungen des 60 cm H.E.S.S.-Spiegels mit verschiedenen Lichtintensitäten durchgeführt. Wird der berechnete Reflektivitätswert für die verschiedenen Lichtleistungen der Halogenlampe gegen die Phasenbegrenzung aufgetragen, so ergibt sich ein Schnittpunkt bei

etwa 45° , s. Abb. 4.13. Die Streulichtintensität betrug dabei 500 nA. Ist die Lichtintensität im Lichtfleck sehr gross, >1 nA, trägt das Rauschen nur vernachlässigbar gering zur Gesamtintensität bei und eine Phasenbegrenzung macht keinen Unterschied in der Reflektivitätsbestimmung. Je geringer die Halogenlampenleistung umso stärker trägt die Rauschamplitude zur Gesamtintensität bei und die Reflektivität steigt ohne eine Phasenbegrenzung. Mit einer Phasenbegrenzung wird das Rauschen unterdrückt und eine korrekte Reflektivität bestimmt. Ab einer maximalen Lichtfleckintensität von 120 pA sind deutliche Abweichungen von der tatsächlichen Reflektivität zu erkennen.

Für die Messungen bei Streulicht wurde daher eine Phasenbegrenzung von 45° verwendet. Die Intensität im Lichtfleck war bei den weiteren Messungen aber stets gross genug, dass weit über dem Rauschen gemessen wurde. Eine Phasenbegrenzung ist bei der später folgenden 2F-Methode wichtig, da dort die Intensitäten recht gering sind.

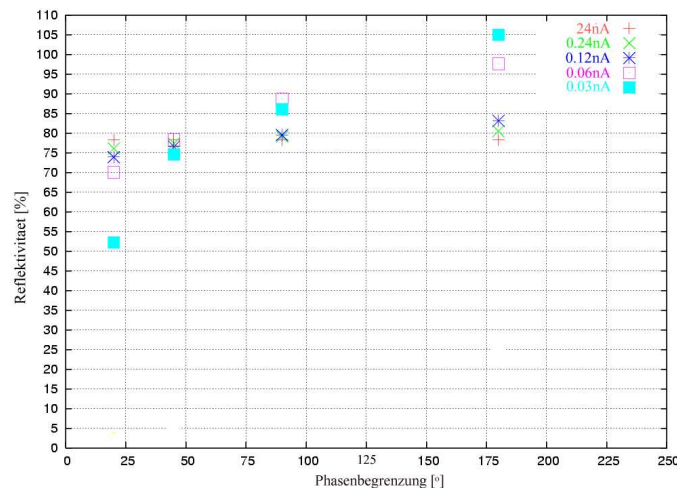


Abbildung 4.13: Reflektivität eines H.E.S.S.-Spiegels für verschiedene Lichtleistungen und Phasenbegrenzungen. Die Angabe des Stromes ist die maximal gemessene Intensität im Lichtfleck.

4.3.3 2F-Messaufbau für Messungen bei $F=35$ m

Das in Planung befindliche Einzelteleskop, das zusätzlich zu den bestehenden 4 Teleskopen gebaut wird, wird Spiegel mit einer hexagonalen Form mit einer Fläche von 0.78 m^2 und einer Brennweite $F=35$ m besitzen, s. Abb. 4.14. Die Qualitätskontrolle der Spiegel soll durch den 2F-Messaufbau erfolgen. Es werden 2 Möglichkeiten vorgestellt wie der 2F-Messaufbau modifiziert werden kann, um die hexagonalen Spiegel zu vermessen.



Abbildung 4.14: Grössenvergleich eines 60cm H.E.S.S.-Spiegels, links, und einem Prototypen eines hexagonalen Spiegels

- 1.) Durch die Verwendung eines Umlenkspiegels beträgt die maximal benötigte Strecke für den Aufbau 40 m, anstatt 70 m. Die Messungen können daher weiterhin in dem genutzten Raum durchgeführt werden. Es wird der Messaufbau erklärt und die bei den Messungen aufgetretenen Probleme näher erläutert.
- 2.) Der Aufbau wird ins Freie verlagert. Der Abstand zwischen Spiegel und Lichtquelle beträgt 70 m. Es werden die benötigten Änderungen des Aufbaus erklärt und die Ergebnisse der Spiegelmessungen vorgestellt.

zu 1) Der zur Verfügung stehende Raum für die 2F-Messungen ist mit 40 m Länge nicht für die Vermessung der hexagonalen Spiegel geeignet, da die Mindestlänge 70 m betragen muss. Um den Raum weiterhin nutzen zu können, ist eine Verringerung der Mindestlänge notwendig.

Die Mindestlänge wird halbiert, wenn ein Umlenkspiegel benutzt wird, s. Abb 4.15. Das Licht der Halogenlampe wird vom Umlenkspiegel auf den hexagonalen

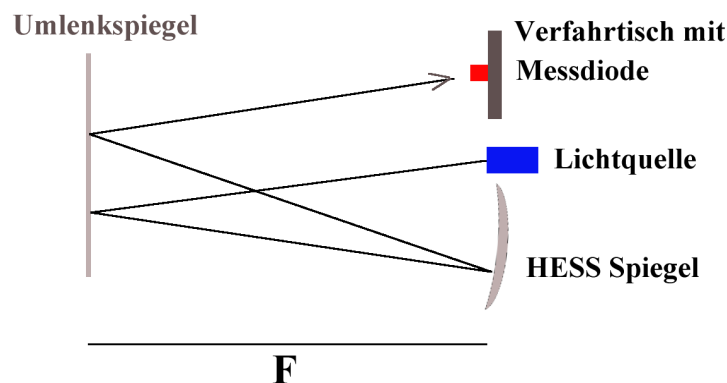


Abbildung 4.15: 2F-Messaufbau mit Benutzung eines Umlenkspiegels

Spiegel reflektiert. Von dort gelangt das Licht wieder über den Umlenkspiegel auf die Photodiode. Der Abstand zwischen Umlenkspiegel und Lichtquelle beträgt nur

die einfache Brennweite von 35 m. Messungen mit dem 2F-Messaufbau könnten daher weiterhin in der zuvor genutzten Räumlichkeit stattfinden.

Für die Reflektivitätsbestimmung der Spiegel ist zu beachten, dass durch die doppelte Reflektion des Lichtes am Umlenkspiegel nicht mehr die Reflektivität des H.E.S.S.-Spiegels bestimmt wird, sondern das Produkt aus der Reflektivität des Umlenkspiegels R_U und des H.E.S.S.-Spiegels R_{HESS} , s. Glg. 4.5.

$$R = R_U^2 * R_{HESS} \quad (4.5)$$

Aus 4.5 ist ersichtlich, dass für die Reflektivitätsbestimmung eines hexagonalen Spiegels der Reflektionsgrad des Umlenkspiegels in Abhängigkeit der Wellenlänge bekannt sein muss. Die Reflektivität des Umlenkspiegels wird bestimmt, indem eine Messung mit einem H.E.S.S.-Spiegel bekannter Reflektivität durchgeführt wird, s. Tabelle 4.1. Der 2F-Messaufbau mit Umlenkspiegel wurde mit dem H.E.S.S.-Spiegel mit $F=15$ m sowie optischen Pulsformer und Lock-In Verstärker aufgebaut und die Reflektivität sowie Winkelauflösung bei allen 4 Wellenlängen bestimmt. Aus dem bekannten Reflektivitätsgrad des H.E.S.S.-Spiegels und dem gemessenen Wert R mit Umlenkspiegel wird die Reflektivität des Umlenkspiegels. Die Messung wurde mehrmals wiederholt.

Berechnet man nun die Reflektivitätswerte für den Umlenkspiegel, schwanken die erhaltenen Werte stark. Übereinstimmende Werte konnten nicht ermittelt werden, da die Werte für R_U sehr davon abhingen, an welchen Teil des Umlenkspiegels das Licht reflektiert wurde.

Um zu überprüfen, dass die Schwankung der Werte für R_U nicht auf den Messaufbau zurückzuführen sind, sondern die Reflektivität über den Umlenkspiegel nicht homogen ist, wurden Messungen mit einem Handreflektometer bei 370 nm durchgeführt. Das Handreflektometer ist ein tragbares Messgerät, welches die Reflektivität von Oberflächen bestimmt. Ein Lichtstrahl mit einer festen Wellenlänge von 370 nm fällt unter einem Winkel von 45° auf die Oberfläche, wird reflektiert und eine Photodiode misst die Intensität des reflektierten Lichtes. Aus dem Quotienten von gemessener und abgeschickter Lichtintensität ergibt sich die Reflektivität. Die Intensität des abgeschickten Lichtes wird mit einem kalibrierten Spiegel bestimmt. Zur Messung wird der Messkopf direkt auf die Spiegelfläche aufgesetzt. Die mit dem Handreflektometer bestimmten Reflektivitätswerte schwankten im Bereich von 70% bis 87%. Reproduzierbare Messungen sind mit diesem Umlenkspiegel nicht möglich, da der H.E.S.S.-Spiegel nicht immer so ausgerichtet werden kann, dass das reflektierte Licht des H.E.S.S.-Spiegels stets an derselben Fläche des Umlenkspiegels reflektiert wird.

Die Werte für die Winkelauflösung wichen nur 0.07 mrad vom Wert der Messung ohne Umlenkspiegel ab, was zeigt, dass der Umlenkspiegel sehr plan ist.

zu 2) Aufgrund der ungenügenden Qualität des Umlenkspiegels war eine weitere Verwendung ausgeschlossen und da auch kein Raum oder Gang des Instituts eine Länge von 70 m besaßen, wurde der Messaufbau ins Freie verlagert. Zuvor mussten jedoch einige Veränderungen am Messaufbau vorgenommen werden.

Der 3-Achs-Verfahrtisch wurde durch einen leichteren und kompakteren 2-Achs-Verfahrtisch ersetzt. Um die Photodiode vor Streulicht abzuschatten, wurde ein 15 cm langes PE-Rohr vor die Diode geschraubt und die innere Wand mit einem schwarzem Material ausgekleidet um Reflektionen zu verhindern. Die Intensität des Streulichtes durch die Sonne wurde dadurch um einen Faktor 100 gesenkt.

Da dies die ersten Messungen bei Tageslicht waren, wurden erste Messungen mit einem H.E.S.S.-Spiegel mit $F=15$ m bekannter Reflektivität durchgeführt. Überraschend war, dass nach der Ausrichtung des Spiegels der Photostrom sehr stark schwankte, obwohl der Scantisch nicht bewegt wurde. Es war deutlich beobachtbar wie sich der Lichtfleck über der Diode hin- und herbewegte. Ursache war die Erhitzung des Asphaltbodens, auf dem der Messaufbau stand, und die dadurch entstehende Wärmekonvektion welche den Lichtstrahl bricht. Bekannt ist dieser Effekt durch das Hitzeflimmern auf Asphaltstrassen.

Da es möglich war, Spiegelmessungen bei Sonnenlicht durchzuführen, wurde im nächsten Schritt der Abstand auf 70 m zu erweitert um die hexagonalen Spiegel $F=35$ m zu messen. Die Ausrichtung der Spiegel gestaltete sich teils als sehr langwierig, da der Lichtfleck mit dem blossen Auge nicht mehr sichtbar war. Einen Laser auf den Spiegel zu richten und den reflektierten Strahl zu erfassen, war nur bei bewölktem Himmel möglich. Der Laserpointer hatte zu wenig Leistung, so dass bei Sonnenlicht der Laser schon nicht mehr auf den Spiegel ausrichtbar war. Die beste Möglichkeit den Lichtfleck zu finden, ist es ihn mit dem Auge zu suchen. Diese Methode hat sich als schnell und effektiv erwiesen.

Für die ersten Messungen standen 4 Prototypen, A1 ...A4, einer armenischen Firma, welche bereits einen Teil der genutzten H.E.S.S.-Spiegel herstellte, zur Verfügung. Bereits mit blossen Auge waren Fehler auf den Spiegeln zu erkennen. Teils war die Beschichtung an den Rändern lückenhaft oder ein blauer Schleier sichtbar.

Nach der Ausrichtung des ersten Spiegel A4, war durch die Sonneneinstrahlung das Schwanken der Intensität im Lichtfleck nachweisbar. Das Wabern des Lichtfleckes wirkt sich natürlich direkt auf die Reflektivitätsbestimmung aus. Um eine quantitative Aussage über den Einfluss des Hitzeflimmern auf die Bestimmung der Reflektivität und der Winkelauflösung treffen zu können, wurde wiederholt hintereinander der H.E.S.S.-Spiegel gemessen. Der Lichtfleck wurde mehrmals hintereinander abgefahren und nur vor der ersten Messung eine einmalige Referenzmessung vorgenommen. Die bestimmten Reflektivitäten stimmten innerhalb von 3% miteinander überein, s.Tabelle 4.2. Zum Vergleich wurden diese Messungen an einem Tag mit Bewölkung wiederholt. Der Unterschied betrug nur noch 0.3%, s.Tab. 4.3. D.h. bei Messungen an warmen Tagen erhöht sich der Fehler in der Reflektivitätsbestimmung. Bei Angabe eines Fehlers auf die Messwerte muss berücksichtigt werden, wie die äusseren Wetterverhältnisse sind. Der Fehler der Messungen vergrössert sich auf 6% wenn an warmen Tagen gemessen wird.

Um den Messfehler gering zu halten wurden die Spiegel nur vermessen wenn die Messtrecke im Schatten lag. Die Ergebnisse der Messungen sind in Tabelle

	Reflektivität [%]	Winkelauflösung [mrad]
1	70.2	0.9
2	73.8	0.94
3	67.5	1.0

Tabelle 4.2: Vermessung eines hexagonalen Spiegels für 470 nm bei starker Sonneneinstrahlung auf den Asphalt. Vor der ersten Messung wurde eine Referenzmessung durchgeführt.

	Reflektivität [%]	Winkelauflösung [mrad]
1	70.6	1.06
2	70.3	1.0
3	70.5	1.06

Tabelle 4.3: Vermessung eines hexagonalen Spiegels für 470 nm ohne Sonneneinstrahlung auf den Asphalt am Morgen. Vor der ersten Messung wurde eine Referenzmessung durchgeführt.

4.4 aufgelistet. 2 Spiegel, A1 und A2, waren für die Messung ungeeignet, da die Winkelauflösung mehr als 2 mrad betrug. Die Winkelauflösung für A3 und A4 schwankten um 1mrad. Der Lichtfleck war sehr unsymmetrisch und besass die Form einer starken Ellipse, s. Abb.4.16 links. Als möglicher Grund kann eine bei der Spiegelherstellung auftretende Vorzugsrichtung angesehen werden. Alle Reflektivitätswerte sind geringer gegenüber dem eines H.E.S.S.-Spiegels.

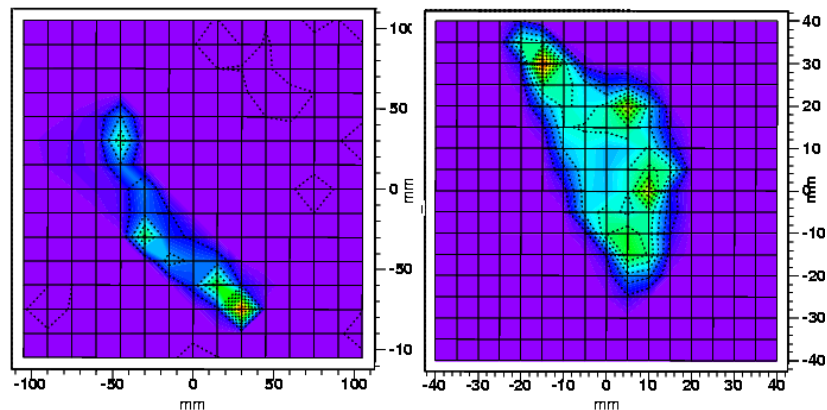


Abbildung 4.16: Prototyp A3, links, und verbesserte Version #10, rechts. Der Spiegel A3 besitzt eine Winkelauflösung von 1mrad. Der Lichtfleck der verbesserten Version ist um einen Faktor 2 auf 0.5mrad verbessert.

Nach Verbesserungen in der Herstellung wurden weitere 10 Spiegel zugeschickt und vermessen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.4 zu sehen. Die Tabelle 4.5 enthält eine Auflistung der Fehlerquellen und eine Abschätzung der Fehler.

Filter	300 nm	400 nm	470 nm	600 nm
R [%]/W [mrad]				
A3	65.5/1.2	67.5/0.9	84.7/1.0	70.5/1.0
A4	64.6/1.2	76.6/1.1	81.0/1.1	73.8/1.2
#1	57.5/0.7	69.0/0.7	68.7/0.74	73/0.74
#2	44.4/0.5	70.9/0.5	77.2/0.5	81/0.5
#3	53.9/0.74	70/0.7	74.5/0.74	79/0.74
#4	59/0.65	78.8/0.63	82.2/0.65	82/0.63
#5	42.8/0.71	54/0.71	62/0.71	74.4/0.71
#6	40.5/1.34	67.2/1.34	72.1/1.34	74.3/1.34
#7	52.6/0.57	77.7/0.54	81.2/0.57	82/0.54
#8	-	>70/>1.46	-	-
#9	46.4/0.45	70.8/0.49	76.3/0.45	79.6/0.49
#10	79/0.4	83.3/0.4	82.1/0.34	84.0/0.43

Tabelle 4.4: R: Reflektivität, W: Winkelauflösung. Ergebnisse hexagonaler Spiegelmessungen

	Messgrösse	Absolute Fehler	Relative Fehler	Einfluss auf R
Spiegelentfernung	Lichtquelle-Spiegel	0.2 m auf 70 m	0.3%	0.6%
Referenzentfernung	Lichtquelle-Diode	1 cm auf 116 cm	0.8%	1.6%
Lampe	Inhomogenität	-	1%	1%
Detektor	Photodiode+ Lock-In Verstärker	-	<2%	<2%
Total	-	-	-	3%

Tabelle 4.5: Die Fehler für die Abstandsmessungen zwischen Lichtquelle, Diode, Spiegel wurden abgeschätzt. Die Inhomogenität des Lichtes ist durch die Genauigkeit der Lampenausrichtung gegeben. Auf die Newport Photodioden und den Lock-In Verstärker wurden vom Hersteller ein Fehler <2% angegeben. Der Gesamtfehler von 3% ergibt sich durch quadratische Summation der Einzelfehler.

Die Winkelauflösung wurde um einen Faktor 2 verbessert, so dass fast alle Spiegel einen Wert von 0.5 mrad erreichten, s. Abb.4.16 . Die Reflektivität liegt insgesamt unter den geforderten Werten und variiert sehr stark zwischen den Spiegeln, was auf einen nicht gleichmässigen Beschichtungsprozess schliessen lässt. Nur der Spiegel #10 erreichte hinsichtlich Winkelauflösung und Reflektivität die geforderte Qualität eines H.E.S.S.-Spiegels. Zu den 10 Spiegeln wurde auch eine kleine Spiegelprobe mitgeliefert, deren Reflektivität mit einem Spektrometer

gemessen wurde. Es zeigten sich Abweichungen von bis zu 20% zwischen den 2F-Messungen und der Probe. Für einen unabhängigen Vergleich wurden die Spiegel stichprobenartig mit dem Handreflektometer gemessen. Die Werte stimmten innerhalb von 5% mit den 2F-Messungen überein. Zusätzlich wurden für einen Spiegel 20 Messpunkte über die gesamte Spiegelfläche genommen. Die Reflektivität war innerhalb von 2% über den gesamten Spiegel konstant. Warum die Spektrometerprobe, obwohl im gleichen Verfahren beschichtet, höhere Werte besitzt, konnte nicht geklärt werden. In Abb. 4.17 ist die Reflektivität der Spektrometerprobe in Abhängigkeit der Wellenlänge zu sehen. Zum Vergleich sind zusätzlich die Reflektivitäten von 4 Spiegeln eingetragen.

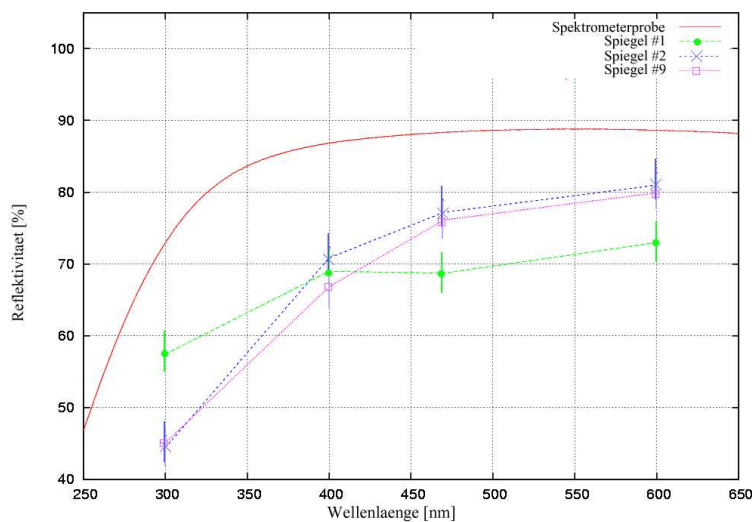


Abbildung 4.17: Spektrometerprobe und 2F Messungen von 3 Spiegeln. Die Spektrometerprobe hat eine viel grössere Reflektivität als die vermessenen Spiegel.

4.3.4 Messungen an hochreflektiven Folien

Spiegel verschiedene Weisen hergestellt werden. Neben der Frontaluminisation oder der rückwärtigen Beschichtung, gibt es auch die Möglichkeit eine reflektive Folie auf die Oberfläche aufzubringen. Bisher konnte jedoch nie die Qualität von Glasspiegeln erreicht werden. Geringere Reflektivitätswerte und schlechte Abbildungseigenschaften verhinderten einen Einsatz. Mit der Entwicklung hochreflektiver Folien, welche mehr als 98% des Lichtes reflektieren, sind Spiegel mit guter Qualität herstellbar. Die wohl beste Folie ist die VM2000 der Firma 3M [5] [6]. Diese Folie ist vollständig unmetallisch, chemisch und mechanisch sehr widerstandsfähig und erreicht durch ihren viellagigen Aufbau einen, durch doppelbrechende Interferenz, hohen Reflektionsgrad im Visuellen von mehr als 98% , s. Abb. 4.18. Eine bis

in den UV-Bereich (bis 310 nm) reflektive Version existiert, war aber für die Messungen nicht verfügbar. Die Versuche wurden daher mit der normalen VM2000 und einem 60 cm H.E.S.S.-Spiegel durchgeführt.

Die Folie wurde in kleine Stücke von etwa 10 cm mal 15 cm zugeschnitten und auf der Rückseite die Schutzfolie des Klebers entfernt.

Das Problem bestand nun darin die Folie so auf den Spiegel aufzubringen, dass diese eben aufliegt, ohne dass Luftblasen eingeschlossen werden. Im ersten Versuch wurde die Kleberschutzfolie abgezogen und die Folie mit einem Gummiroller aufgebracht. Im zweiten Versuch wurde die Spiegeloberfläche mit Seifenwasser benetzt und darauf die Folie gelegt. Dieses Verfahren bietet die Möglichkeit die Folie auf der Oberfläche zu verschieben. Mit dem Gummiroller wurde dann über die Oberfläche gefahren und das Wasser verdrängt. Nach kurzer Zeit war auch diese Folie fest auf der Oberfläche. Obwohl keine Luftblasen eingeschlossen waren, zeigten sich Schlieren auf den Folien. Dies ist auf den Kleber zurückzuführen, welcher sich unter dem Druck des Gummirollers ungleichmässig verteilt. Für die 2F-Messungen wurde der Bereich ausserhalb der Folie mit schwarzem Papier abgedeckt. Im Bereich zwischen 400 nm bis 500 nm betrug die Reflektivität 100% mit einem Fehler von 3%. Die Winkelauflösung betrug 2.3 mrad, was mehr als einen Faktor 2 über der geforderten Spezifikation von 1mrad liegt.

Gelänge es, ein Verfahren zu finden, welches die Folienaufbringung optimiert, so wäre es möglich hochreflektive Spiegel kostengünstig herzustellen. Unter Umständen ist es sogar möglich, die Folie einfach abzuziehen, wenn die Reflektivität unter einen bestimmten Wert sinkt, und durch eine Neue zu ersetzen.

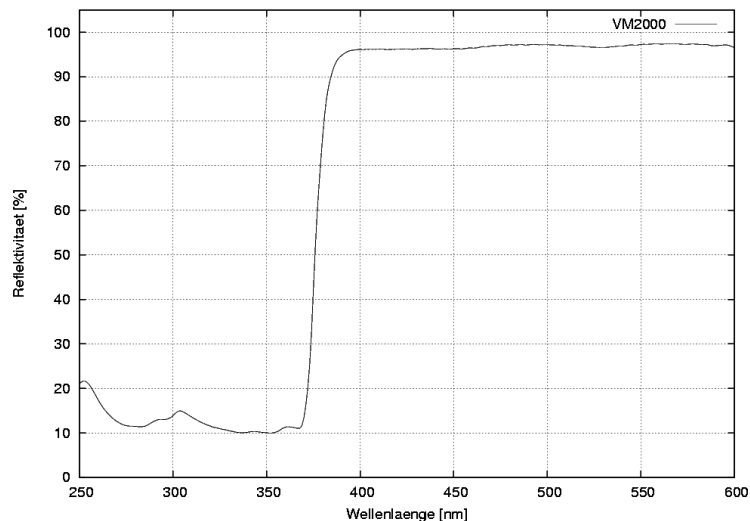


Abbildung 4.18: Darstellung der mit einem Spektrometer gemessenen Reflektivität. Die Reflektivität ist bis zu 380 nm grösser 95%.

Kapitel 5

Messverfahren zur Reflektivitätsbestimmung der H.E.S.S.-Teleskope

Die Spiegel der H.E.S.S.-Teleskope sind ganzjährig den Umweltbedingungen in Namibia ausgesetzt. Regen, Staub, Vögel sind eine ständige Belastung der Oberfläche. Da eine reine reflektierende Aluminiumschicht dem nur für kurze Zeit standhalten würde, ist eine zusätzliche Quartschicht zum Schutz aufgetragen. Jedoch bietet dies keinen dauerhaften Schutz und die Reflektivität sinkt zunehmendem Alter der Spiegel. Um quantitative Aussagen über die Reflektivität treffen zu können, ist ein Messverfahren notwendig, welches die montierten Spiegel auf dem Teleskop vermessen kann. Der Messaufbau muss kompakt, einfach handhabbar sein und die Reflektivität auf mindestens 5% genau bestimmen können. Im Folgenden werden Methoden vorgestellt welche diese Bedingungen erfüllen.

5.1 Mögliche Messverfahren

5.1.1 Messung mit dem Handreflektometer

Die einfachste Methode ist die Nutzung eines Handreflektometers. Für jeden Spiegel wird an mehreren Punkten mit dem Messkopf die Reflektivität bestimmt. Aus den Messwerten lässt sich der Mittelwert der Reflektivität eines Teleskops berechnen. Das bedeutet aber auch, dass pro Teleskop mehr als 1000 Messpunkten erforderlich sind. Für die gesamte Vermessung eines Teleskop ist daher ein grosser Zeitaufwand nötig. Weiterhin wird jeder Spiegel nur punktuell vermessen, so dass nicht ausgeschlossen werden kann, dass die Reflektivität eines gesamten Spiegels und dadurch des gesamten Teleskops, einen Wert besitzt der von den Messwerten des Handreflektometers abweicht. Eine Bestimmung der Reflektivität eines Teleskops bei mehreren Wellenlängen ist nur bei Nutzung verschiedener

Handreflektometer möglich. Dies würde die Anzahl der Messungen nochmals mindestens verdoppeln. Da bis dato keine andere Möglichkeit der Reflektivitätsbestimmung möglich war, wurde von den Technikern vor Ort in Namibia die Reflektivität jedes Teleskop mit dem Handreflektometer bestimmt. Das Ergebnis ist eine Reflektivität der Spiegel z.B. von CT3 im Bereich von 68% bis 75%. Die Reflektivität ist damit etwa 5% - 10% geringer als vor Montage der Spiegel.

5.1.2 2F-Methode mit Scantisch

Die Idee hierbei ist das Teleskop als einen ganzen Spiegel zu betrachten. In einer Entfernung von 30 m zum Teleskopmittelpunkt werden Lichtquelle und Scantisch mit darauf montierter Photodiode aufgestellt. Das Teleskop wird auf die Lichtquelle ausgerichtet, so dass das reflektierte Licht auf die Photodiode trifft. Der Altitudewinkel des Teleskops beträgt etwa -20° . Der Lichtfleck wird in einem Raster mit definierter Schrittweite vom Scantisch abgefahren. Durch die Verwendung eines vor der Photodiode montierten Filterrades oder verschiedenfarbiger LED ist eine Bestimmung der Reflektivität eines Teleskops bei mehreren Wellenlängen möglich. Ein Nachteil ist, dass einzelne Spiegel nicht aufgelöst werden und daher nur die Gesamtreflektivität eines Teleskops bestimmt wird. Diese Methode hat den Vorteil, dass der bestehende 2F-Messaufbau zur Reflektivitätsbestimmung von Einzelspiegeln für die Teleskopmessungen benutzt werden kann.

5.1.3 2F-Methode mit Teleskop

Diese Methode ist sehr ähnlich zur Vorhergehenden. Photodiode und Lichtquelle werden in einer festen Entfernung von z.B. 30 m angebracht. Das Teleskop wird ausgerichtet, so dass das reflektierte Licht auf die Photodiode trifft. Wird das Teleskop von dieser Position weg bewegt, wandert auch der Lichtfleck. Das Teleskop fährt ein Raster in Azimuth-/Altituderichtung und der Photostrom an wird an jedem Rasterpunkt gemessen. Vorteil bei diesem Verfahren ist, dass die Entfernung zum Teleskop nicht 30 m betragen muss. Eine grössere Entfernung zum Teleskop würde den Lichtfleck vergrössern, so dass auch einzelne Spiegel aufgelöst werden können. Dies geht zwar auch mit dem Scantisch, aber es können nur Ausschnitte gemessen werden, da der Lichtfleck grösser als der Verfahrensweg des Scantisch ist. Es besteht so die Möglichkeit die Reflektivität einzelner Spiegel zu bestimmen. Es ist möglich genau festzustellen welcher Spiegel z.B. ausgetauscht werden muss. Der Aufbau ist sehr kompakt da nur eine Lichtquelle und ein Messgerät für den Photostrom benötigt werden. Dieses Verfahren ist aber nicht vorrangig einsetzbar, da das Teleskop unter dem Horizont den Lichtfleck abfahren muss. Dies ist nur möglich wenn verschiedene Sicherheitsschalter überbrückt werden. Bei der 2F-Methode mit Scantisch wird das Teleskop zwar unter den Horizont gefahren, das Teleskop wird aber einmalig ausgerichtet und danach nicht mehr bewegt.

5.1.4 20F-Methode

Treffen parallele Mittelpunktsstrahlen auf einen sphärischen Spiegel so werden diese in einem Punkt, dem Brennpunkt, gesammelt. Das heisst, Licht einer weit entfernten Quelle wird vom Teleskop in der Kameraebene gebündelt. Eine Lichtquelle deren Entfernung nicht sehr gross ist gegen die Brennweite, erzeugt einen ausgedehnten Lichtfleck. Eine in der Kameraebene befestigte Photodiode misst die Intensität des Lichtflecks. Wird das Teleskop um einen Winkel aus der Sichtlinie zur Lichtquelle gedreht, bewegt sich der Lichtfleck ebenfalls. Das Teleskop fährt ein Raster mit definierter Schrittweite. An jedem Rasterpunkt wird die Intensität mit der Photodiode gemessen. Aus der Teleskopposition und der Lichtintensität kann eine Intensitätsverteilung des Lichtflecks in der Kameraebene angegeben werden. Aus der Referenzintensität der Photodiode im direkten Lichtstrahl, der Gesamtintensität des Lichtflecks und der Entfernung der Lichtquelle zum Teleskop lässt sich die Reflektivität eines Teleskops analog dem 2F-Verfahren berechnen. Der Vorteil dieses Verfahrens ist, dass nur zwei Photodioden, eine Lichtquelle und der Lock-In Verstärker benötigt werden. Das Teleskop muss nur maximal 3° unter den Horizont geneigt werden.

5.2 Anforderungen an die Messmethoden und Realisierung

5.2.1 2F-Methode

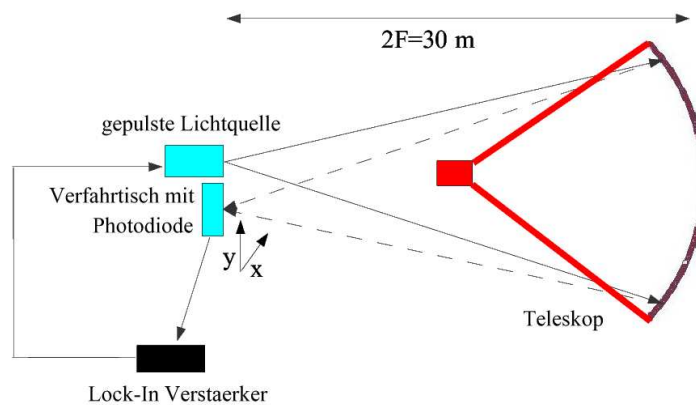


Abbildung 5.1: Schema des Messaufbaus

Für die Verwendung des 2F-Verfahrens zur Reflektivitätsbestimmung müssen mehrere Voraussetzungen erfüllt sein.

- a) Die Filter dürfen die Intensitätsmessung nicht beeinflussen.
- b) Das Teleskop muss homogen ausgeleuchtet werden.

- c) Die Intensität der Lichtquelle muss mit dem Quadrat des Abstandes abfallen.
- d) Die gesamte beleuchtete Spiegelfläche muss bekannt sein.

Im Folgenden wird auf die Anforderungen an die einzelnen Komponenten des 2F-Messaufbaus eingegangen und die Modifikationen der Komponenten erklärt.

zu a) Zur Wellenlängenselektierung des Spektrums der Halogenlampe ist vor der Photodiode ein Filterrad angebracht. Die Angabe der Transmissionswellenlänge der Filter bezieht sich dabei auf senkrecht auf die Filteroberfläche einfallendes Licht. Wird das Teleskop mit einer Lichtquelle aus 30 m Entfernung beleuchtet, fällt das reflektierte Licht der äusseren Spiegel jedoch unter einem Winkel von max. 12° auf den Filter. Es wurde daher untersucht wie die Transmissionswellenlänge vom Einfallswinkel auf den Filter abhängt. Dazu wurde im Labor ein Versuchsstand aufgebaut. Die Photodiode mit dem aufschraubbaren Filteraufsatz war drehbar gelagert befestigt. In einer Entfernung von 1 m befand sich eine LED als Lichtquelle. Für definierte Winkel zwischen $\pm 20^\circ$ wurde der Photostrom mit einem Amperemeter gemessen. Zuerst wurde die Intensitätsverteilung ohne Filter gemessen. Der Intensitätsverlauf wird durch einen Kosinus beschrieben, der durch die Verringerung der effektiven Diodenfläche entsteht, s. Abb. 5.2. Die nächste Messung erfolgte mit einem Filter vor der Photodiode. Um nur den Einfluss des Filters zu erhalten, wurden die Messwerte um den Kosinus des Winkels korrigiert. Abb. 5.3 zeigt die Intensität in Abhängigkeit des Einfallswinkel des Lichtes auf den Filter. Für einen Winkel von 12° sinkt die Intensität um 50%. D.h. für einen äusseren Spiegel ist im Vergleich zu einem inneren Spiegel die Intensität des reflektierten Lichtes nach dem Filter um 50% geringer. Die Reflektivität eines Teleskopes würde also völlig falsche Werte ergeben. Der Grund dieser starken Abhängigkeit der Transmissionswellenlänge vom Einfallswinkel hängt mit dem Aufbau der Filter zusammen. Bei den verwendeten Filtern handelt es sich um Interferenzfilter. Durch konstruktive Interferenz wird nur ein schmaler Wellenlängenbereich des Filters transparent. Die Halbwertsbreite beträgt im allgemeinen 5 nm. Trifft Licht unter einem Winkel auf den Filter, verändern sich die Laufwege des Lichtes im Filter und damit die Transmissionswellenlänge des Filters. Die Transmissionswellenlänge eines Filters wird durch Glg. 5.1 [7] beschrieben. Der Brechungsindex des Filtermaterials wird mit n bezeichnet, α ist der Winkel zum Lot auf die Oberfläche, λ_i die Transmissionwellenlänge bei senkrechtem Einfall. Abb. 5.4 zeigt die nach Glg. 5.1 berechnete Transmissionswellenlänge in Abhängigkeit des Einfallswinkels auf die Filteroberfläche. Für einen Einfallswinkel von 12° verschiebt sich die Transmissionswellenlänge um 7 nm.

$$\lambda_a = \lambda_i \cdot \frac{n^2 - \sin^2(\alpha)}{n^2} \quad (5.1)$$

Für eine Lichtquelle die über den gesamten Wellenlängenbereich eine konstante Intensität hat, ist die Intensität nach dem Filter unabhängig vom Einfallswinkel. Die verwendete Halogenlampe besitzt nicht diese Eigenschaft sondern wird als

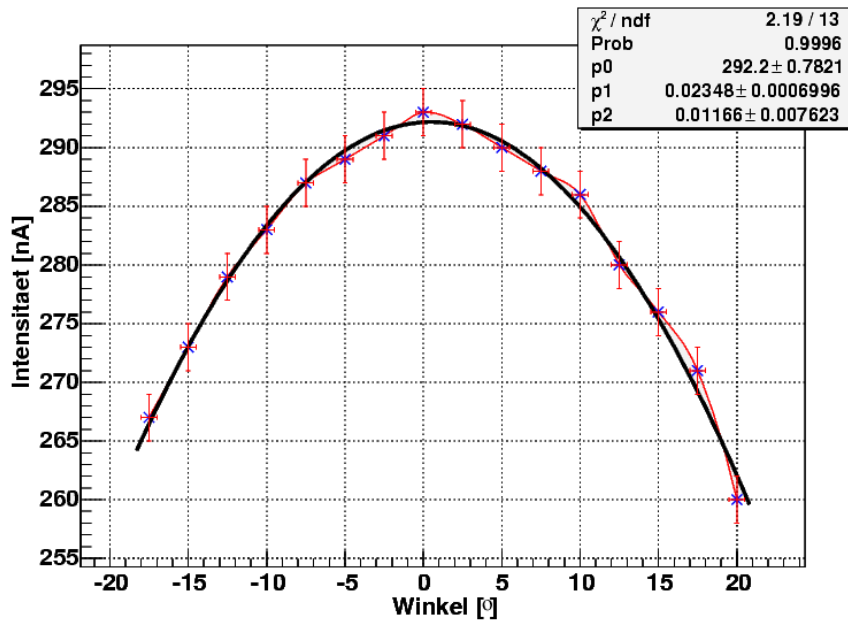


Abbildung 5.2: Intensität als Funktion des Einfallswinkel auf die Photodiode; der Verlauf wird durch eine Funktion der Form $a \cdot \cos \varphi$ beschrieben.

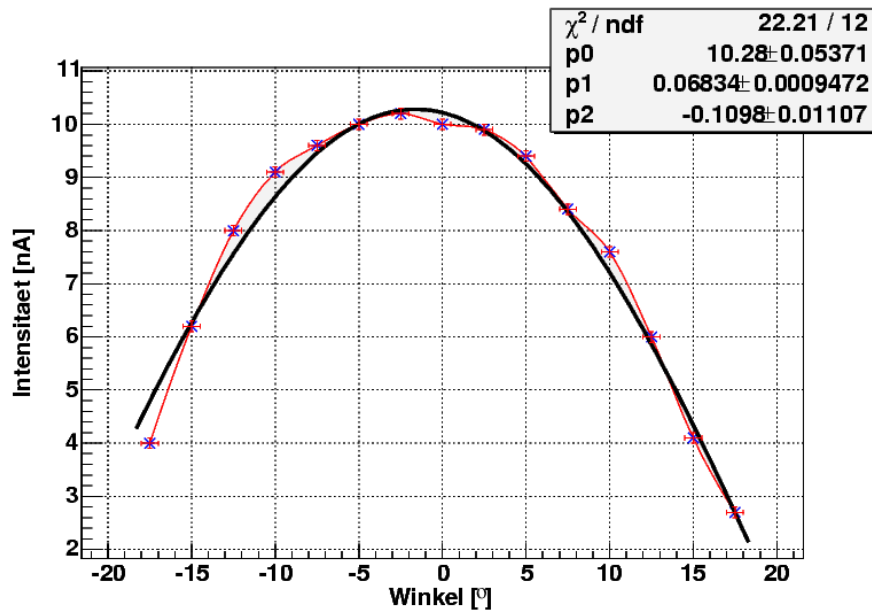


Abbildung 5.3: Winkelabhängigkeit der Intensität für einen 470 nm Interferenzfilter normiert auf die Diode ohne Filter. Die durchgezogene Linie ist eine Funktion der Form $b \cdot \cos(c \cdot \varphi)$.

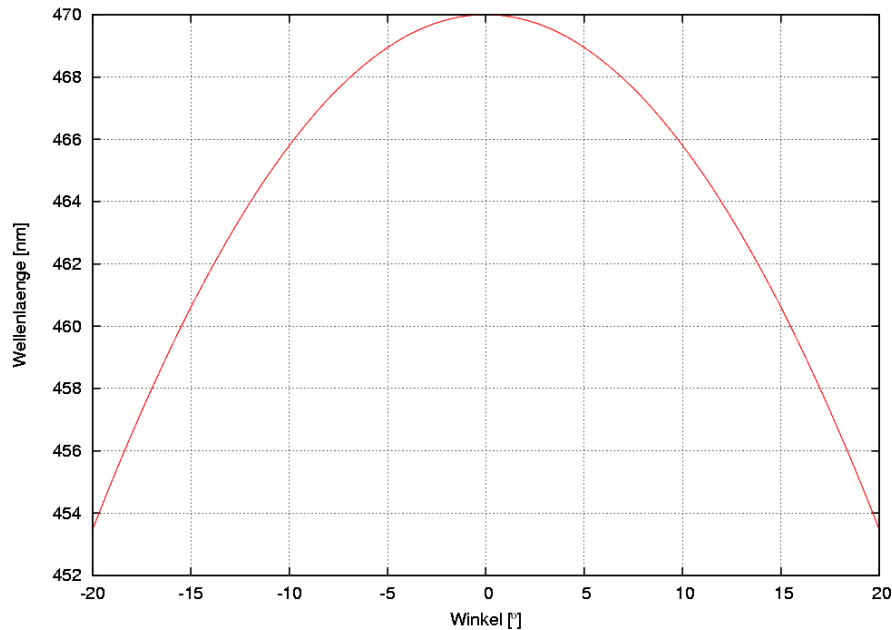


Abbildung 5.4: Berechnete Transmissionswellenlänge eines Interferenzfilters in Abhängigkeit des Einfallswinkel nach Glg. 5.1 mit $n=1.3$

ein schwarzer Strahler mit einer Farbtemperatur von 3500 K beschrieben. Für Messungen mit Filter bedeutet es, dass bei schrägem Lichteinfall auf den Filter die Transmissionswellenlänge vom Einfallswinkel abhängt und ein anderer Teil des Lampenspektrums mit verschiedener Intensität den Filter passiert. Berechnet man dieses Schwarzkörperspektrum, so ergibt sich für einen Winkel von 15° , d.h. einer Transmissionswellenlänge von 460 nm anstatt 470 nm, ein Intensitätsunterschied von 6.5%.

Bei der Messung des von den Teleskopspiegeln reflektierten Lichtes kann durch diese grosse Winkelabhängigkeit der Intensität nach einem Filter, kein Filter direkt vor der Photodiode benutzt werden. Um weiterhin Filter benutzen zu können, wurde eine Halterung für die Filter gebaut, so dass die Filter direkt vor der Halogenbirne montiert sind. Durch die Montage direkt vor der Halogenbirne trifft das Licht stets senkrecht auf den Filter, so dass die Winkelabhängigkeit des Filters keine Rolle mehr spielt. Die Filter werden per Hand gewechselt, da sich das schwarze Filterrad zu sehr erhitzt. Im Gegensatz zur Halogenlampe werden bei einer LED als Lichtquelle keine Filter benötigt, da, ausser bei einer weissen LED, nur in einem schmalen Wellenlängenbereich emittiert wird.

zu b) Ebenso wie bei den Einzelspiegelmessungen ist die homogene Ausleuchtung des Teleskops notwendig. Aus Abschnitt 5.1 ist bekannt, dass das Lichtfeld nach dem optischen Pulsformer in einer Entfernung von 30 m in einem Radius von 1.5 m vom Intensitätsmaximum um 3% schwankt, das der LED bei einem Radius von 3 m. Für ein Teleskop muss die gesamte Spiegelfläche mit einem Radius von

6 m homogen ausgeleuchtet werden. Dies entspricht einem Winkelbereich von 24° für eine Lichtquelle in einer Entfernung von 30 m zum Teleskop. Dies wird nur erreicht, indem eine Streuscheibe vor der Halogenlampe und dem Filter, bzw. der LED befestigt wird. Es wurde eine Volumenstreuscheibe eingesetzt, da bei dieser laut Datenblatt die Abnahme der Lichtintensität mit dem Winkel von den zur Verfügung stehenden Streuscheiben am geringsten ist, s. Abb. 5.5. Für einen Winkel von 12° sinkt die Intensität um 5%.

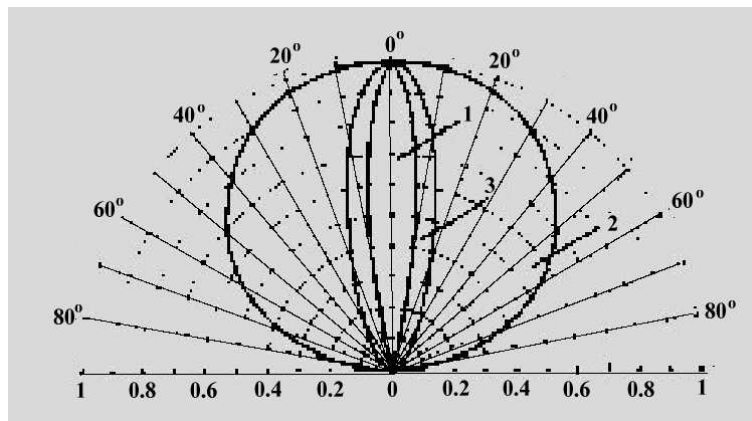


Abbildung 5.5: Lichtindikatrix für 1) Oberflächen- 2) Volumen- 3) Überfangstreuscheibe, [8]

Die Werte des Datenblattes wurden mit Lichtfeldmessungen einer Halogenlampe mit Filter, Streuscheibe und optischen Pulsformer, sowie einer LED mit Streuscheibe überprüft. Abb. 5.6 zeigt die mit dem Scantisch und darauf montierter Photodiode gemessene Lichtfeld der LED mit Streuscheibe. Für die LEDs sinkt die Intensität mit Streuscheibe ausgehend vom Maximum der Lichtintensität um 4.1% für einen Winkel von 12° . Das Lichtfeld der Halogenlampe mit Streuscheibe wurde ebenfalls vermessen. Die Intensität der Halogenlampe sinkt für einen Winkel von 12° um 6%. Die Kombination mehrerer Streuscheiben brachte keine Verbesserung. Durch den definierten Verlauf des Lichtfeldes kann diese Inhomogenität bei den Messungen später korrigiert werden. Die Inhomogenität des Lichtfeldes der LED bedeutet, dass die Lichtintensität an den äusseren Spiegel des Teleskops gegenüber den innersten Spiegeln um 4.1% geringer ist.

Für die Lichtfeldmessungen wurde bisher angenommen, dass die Teleskope einen Krümmungsradius von 30 m besitzen. Wie in Abschnitt 3.3 erklärt, sind die Teleskope aber nach dem Davis-Cotton-Design gebaut. D.h. für die 2F-Methode, dass die Distanz D zu den äusseren Spiegeln geringer als 30 m ist. Die Intensität erhöht also um einen Faktor $(30 \text{ m})^2/D^2$. Der Abstand D bezeichnet den realen Abstand zwischen den Spiegeln und der Lichtquelle, der durch das Davis-Cotton-Design gegeben ist. Die Lichtintensität in der Spiegelebene der Teleskope wird also durch zwei Dinge beeinflusst. Einmal durch die Inhomogenität des Lichtfeldes,

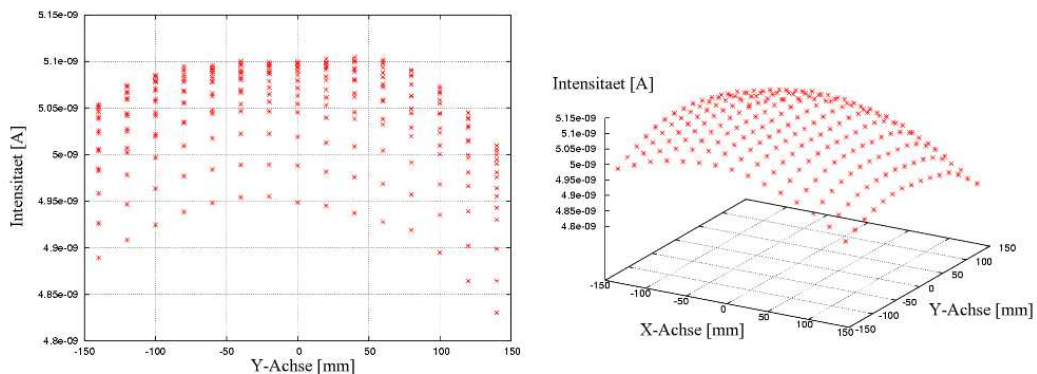


Abbildung 5.6: Gemessenes Lichtfeld nach einer LED mit Volumenstreuuscheibe im Abstand von 75 cm. 12° entsprechen dem Punkt $(x,y)=(140,140)$

so dass äussere Spiegel weniger hell beleuchtet werden. Zum Anderen sind die äusseren Spiegel näher zur Lichtquelle, so dass sich die Intensität wieder erhöht. Da beide Effekte gerade gegeneinander wirken, kommt es zu einer teilweisen Kompensation. Abb. 5.7 zeigt den erwarteten Intensitätsverlauf in der Spiegelebene. Die Inhomogenität ist maximal 1.5%.

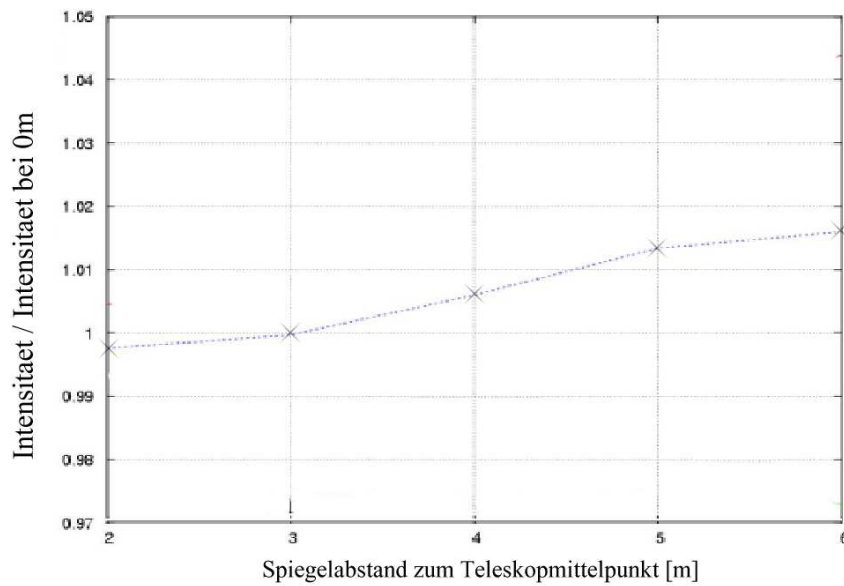


Abbildung 5.7: Darstellung der Lichtintensität an den Spiegeln in Abhängigkeit der Spiegelentfernung zum Teleskopzentrum, normiert auf die Intensität im Teleskopzentrum.

Der Intensitätsverlauf setzt aber voraus, dass das Maximum der Lichtintensität mit der optischen Achse des Teleskops übereinstimmt. Dies wird erreicht, indem die Lichtquelle dementsprechend ausgerichtet wird. Dazu wurde ein Aluminiumgestell

gefertigt welches dreh- und neigbar ist. Die Halogen- und LED-Lampe können darauf per Adapter befestigt werden. Die Winkel werden an einer Gradskala abgelesen. Zur Ausrichtung der Lichtquelle an einem Teleskop besteht die Möglichkeit in der Mitte der Kamerarückseite des Teleskops eine Photodiode zu befestigen und durch Drehen der Lampe das Intensitätsmaximum auf die Kamera auszurichten. Das Ausrichten der Lichtquelle wurde simuliert, in dem die Entfernung zwischen der Photodiode und der Lichtquelle auf 15 m erweitert und für einen Winkelbereich von 40° die Intensitätsverteilung gemessen wurde. Abbildung 5.8 zeigt die Abhängigkeit der Intensität vom Drehwinkel. Das Intensitätsmaximum kann auf 1° genau bestimmt werden.

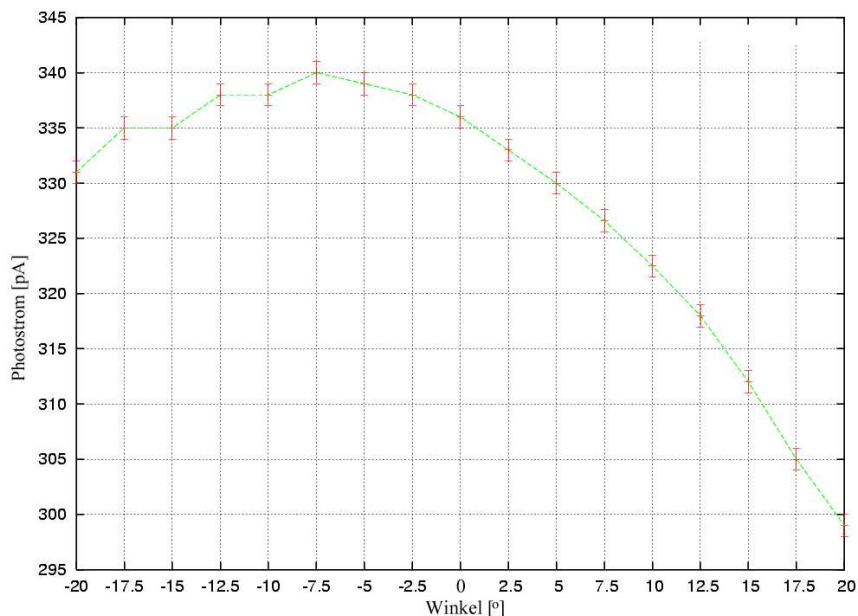


Abbildung 5.8: Lichtfeld in 15 m Entfernung zur Lichtquelle.

zu c) Neben einer homogen Ausleuchtung eines Teleskops wird vorausgesetzt, dass die Lichtintensität mit dem Quadrat des Abstandes zur Lichtquelle abfällt. Für die Halogenlampe mit optischem Pulsformer wurde dies bereits in Kap. 4 gezeigt. Die Verwendung der Streuscheibe verändert aber die optischen Eigenschaften, so dass die Lichtintensität nicht mehr zwingend mit dem Abstandsquadrat abfällt. Zur Überprüfung wurde die Photodiode genau auf die optische Achse der LED mit Streuscheibe ausgerichtet und der Abstand d von 20 cm bis 300 cm variiert. Aus Abb. 5.9 ist zu erkennen, dass die Intensität innerhalb der Fehler mit dem Abstandsquadrat absinkt.

Die Benutzung einer Streuscheibe bringt aber Einschränkungen und Nachteile mit sich. So sinkt die Intensität mit Streuscheibe um 30%. Das Glas der Volumenstreuung absorbiert im UV-Bereich, so dass nur Wellenlängen grösser 350 nm benutzt

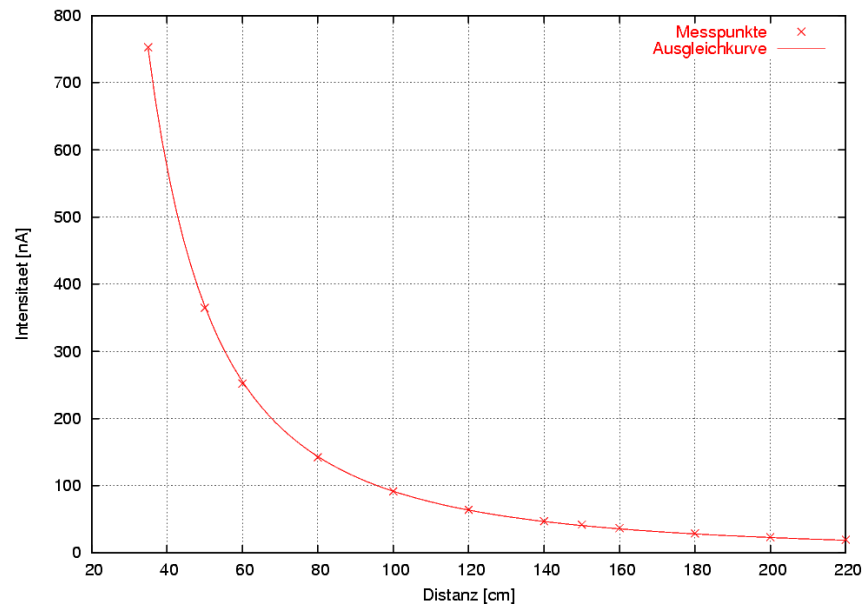


Abbildung 5.9: Lichtintensität als Funktion des Abstandes zur LED mit Streuscheibe. Innerhalb der Messfehler liegen die Messpunkte auf der Ausgleichgeraden die mit $1/d^2$ abfällt

werden können, s. Abb. 5.10.

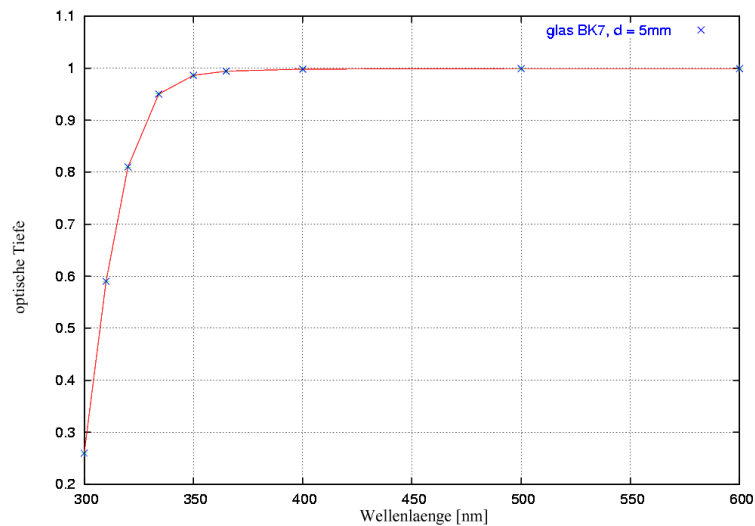


Abbildung 5.10: Transmissionsfaktor der Volumstreuuscheibe; unter 350 nm sinkt der Transmissionsfaktor der Volumstreuuscheibe stark ab [8]

zu d) Beleuchtet man die Spiegel aus 30 m Entfernung so schatten die Kamera und die Stahlträger einen Grossteil inneren Spiegel ab. Die tatsächlich beleuchtete

Spiegelfläche wird unter der gesamten Spiegelfläche von 107 m^2 liegen. Mit einer Monte-Carlo-Simulation [9], welche das Teleskopdesign und die Abschattung durch die Kamera und die Stahlträger berücksichtigt, wurde die effektive Spiegelfläche zu 80.2 m^2 bestimmt. Abb. 5.11 zeigt die Monte-Carlo-Simulation der effektiven Spiegelfläche.

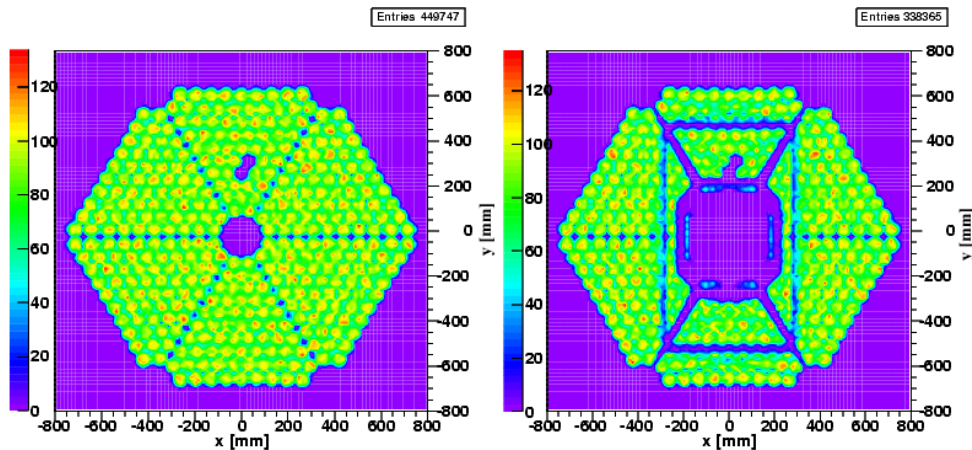


Abbildung 5.11: Monte-Carlo-Simulation [9] der effektiven Spiegelfläche für eine Lichtquelle in 30 m Entfernung; von 107 m^2 werden nur 80.2 m^2 beleuchtet; Ergebnis ohne Abschattung(links); Ergebnis mit Abschattung(rechts)

5.2.2 20F Methode

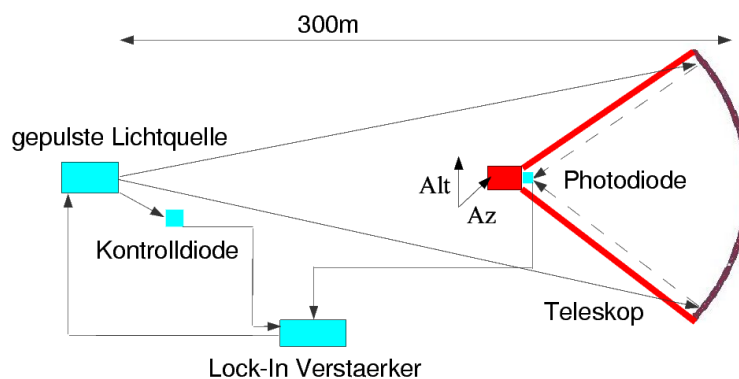


Abbildung 5.12: Schema des 20F-Messaufbaus

Ohne einen weiteren unabhängigen Messaufbau können die 2F-Messungen nur mit den Werten des Handreflektometers verglichen werden, welche einen grösseren Fehler besitzen. Es wurde ein zweites unabhängiges Messverfahren entwickelt um die Reflektivitätswerte auf Konsistenz zu überprüfen. Das 20F-Verfahren hat sich

für diesen Zweck als sehr geeignet herausgestellt. In diesem Abschnitt wird die Funktionsweise und die erforderlichen Tests des Messaufbaus erklärt.

Wird der Abstand von 30 m zwischen Lichtquelle und Teleskop vergrössert, wird ab einer bestimmten Entfernung das gesamte reflektierte Licht auf den Kameradeckel reflektiert. Je entfernter die Lichtquelle umso geringer ist die Grösse des Lichtflecks. Auf dem Kameradeckel wird eine Photodiode befestigt, mit der die Intensität gemessen wird. Da es sich um einen ausgedehnten Lichtfleck handelt, muss wieder ein Raster abgefahren werden. Dazu kann das Teleskop benutzt werden. Das Teleskop fährt ein Raster in Altitude- und Azimuthrichtung und an jedem Rasterpunkt wird die Intensität gemessen. Die 20F-Methode hat den Vorteil, dass Elektronik und Lichtquellen des 2F-Versuches verwendet werden können. Dies spart viel Material, Zeit und Testversuche.

In einem ersten Schritt musste berechnet werden, ab welcher Entfernung der Lichtquelle zum Teleskop das Licht auf den Kameradeckel reflektiert wird und ob die Lichtintensität im Lichtfleck innerhalb des Messbereiches des Lock-In Verstärkers liegt. Ist die Entfernung zwischen Lichtquelle und Teleskop zu gross bzw. die Lichtintensität in der Kameraebene zu gering, wäre das Verfahren hinfällig. Aus geometrischen Betrachtungen des Strahlverlaufes einer Lichtquelle in einer Entfernung L zum Teleskop wurde der Radius r des Lichtflecks berechnet. Für den Abstand der Lichtquelle als Funktion des Lichtfleckradiuses ergibt sich folgende Abschätzung

$$L \approx \frac{100 \text{ m}^2}{r} \quad (5.2)$$

Für eine Entfernung von 300 m ergibt sich aus Glg. 5.2 ein Radius von 33 cm. Aus dem Radius des Lichtflecks und Entfernung zur Lichtquelle lässt sich die mittlere Intensität in der Kameraebene berechnen. Die Gesamtintensität des auf das Teleskop einfallendes Lichtes berechnet sich zu

$$I_{ges} = A_{tel} \cdot I_{1m} \cdot L^{-2} \quad (5.3)$$

A_{tel} ist die Spiegelfläche in cm^2 , I_{1m} die Lichtintensität in einem Meter Entfernung zur Lichtquelle auf der Fläche von 1 cm^2 , L die Distanz Teleskop-Lichtquelle. Diese Gesamtintensität verteilt sich auf eine Fläche von πr^2 in der Kameraebene. Die mittlere Lichtstärke ist

$$I_{cam} = \frac{I_{ges}}{\pi r^2} \quad (5.4)$$

Wird I_{ges} durch Glg. 5.3 und r durch Glg. 5.2 ersetzt, ergibt sich folgende Gleichung für die mittlere Intensität in der Kameraebene.

$$I_{cam} = \frac{A_{tel} \cdot I_{1m}}{10^8 \text{ cm}^2 \cdot \pi} = 0.0034 \cdot I_{1m} \quad (5.5)$$

Dieses Ergebnis ist sehr überraschend, da nach Glg. 5.2.2 die mittlere Lichtintensität in der Kameraebene unabhängig von Radius und Entfernung ist. Die Intensitätsabnahme

in der Kameraebene durch eine grössere Entfernung zur Lichtquelle wird gerade durch eine Verkleinerung des Lichtflecks kompensiert. Glg. ist nur als Abschätzung zu betrachten, da Glg. 5.2 bereits eine Näherung darstellt. Eine genauere Lichtfleckgrösse erhält man durch Monte-Carlo-Simulationen. Eine Monte-Carlo-Simulation [9] einer Lichtquelle in 300 m Entfernung ist in Abb.5.13 dargestellt und ergibt einen etwas grösseren Radius von 40 cm. Weiterhin zeigt die Abb.5.13, dass die Intensität nicht gleichmässig über den Lichtfleck verteilt ist, sondern einzelne Spiegel separat abbilden. Im Prinzip wäre es dadurch möglich die Reflektivität einzelner Spiegel zu bestimmen. Glg. 5.2.2 zeigt, dass die mittlere Intensität des

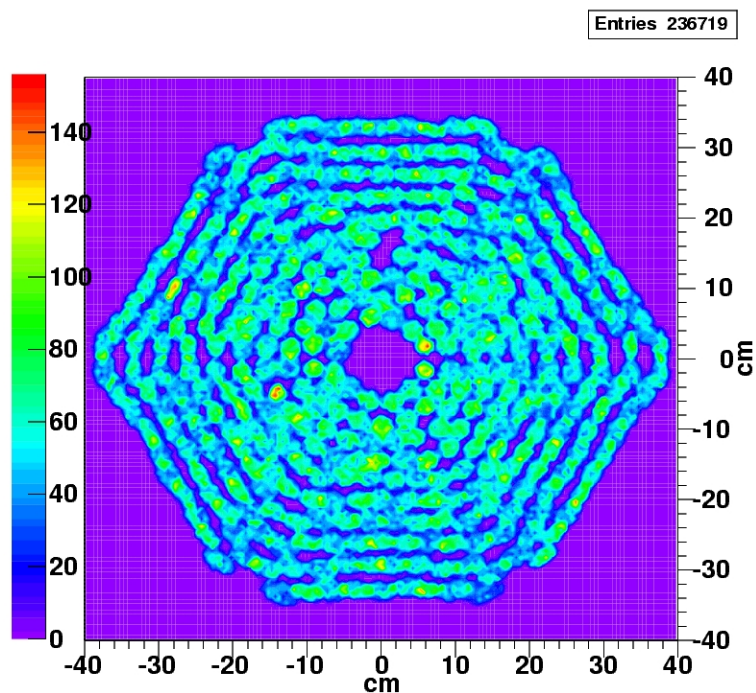


Abbildung 5.13: Simulation der Lichtverteilung in der Kameraebene einer in 300 m entfernten Lichtquelle. Die Simulation berücksichtigt nicht die Abschattung durch Kamera und Masten. [9]

Lichtflecks gering ist. Für die Berechnung der Intensität ist nach Glg. 5.2.2 die Lichtintensität in 1 m Entfernung erforderlich. Die Intensität wurde mit einer 1 cm^2 Photodiode und Lock-In Verstärker gemessen. Es stellte sich heraus, dass die weisse 3 W LED den meisten Photostrom mit 860 nA lieferte. Nach Glg. 5.2.2 wird dies 3 nA in der Kameraebene bedeuten. Da die Nachweisgrenze des Lock-In Verstärkers bei wenigen pA liegt, ist es möglich die Intensität zu messen. Als Einschränkung gilt aber, dass die Messungen bei Nacht durchgeführt werden müssen, da die Sonnenlichtintensität zu gross ist. Die Nutzung der Halogenlampe incl. optischen Pulsformer ist ebenso möglich. Die mittlere Intensität ist aber um etwa einen Faktor 2 geringer. Im UV-Bereich kann nicht gemessen werden, da die

Intensität der Halogenlampe nicht ausreicht.

Aus der Angabe der Lichtfleckgrösse kann nun die Zeitdauer einer Messung berechnet werden. Die benötigte Zeit für eine Messung hängt davon ab wie fein das vom Teleskop gefahrene Raster ist. Für eine Messdiode mit einer aktiven Fläche von 1 cm^2 wird die Spaltenbreite in Azimuthrichtung 0.5 cm bis 1 cm betragen, so dass auch feinere Strukturen auflösbar sind. Im Gegensatz dazu wird in Altituderichtung das Teleskop mit konstanter Geschwindigkeit gefahren. Es würde einfach zuviel Zeit in Anspruch nehmen jeden Punkt einzeln anzufahren. Hingegen wird immer nach einer bestimmten Zeit die Intensität gemessen. Bei einer max. möglichen Auslesefrequenz von 9 Hz des Lock-In Verstärkers und einer geforderten Distanz der Messpunkte voneinander mit max. 1 cm , wird die Altitudegeschwindigkeit höchstens 90 mm/s betragen. Ein Lichtfleck mit einem Radius von etwa 40 cm ist in etwa 30 min bis 60 min vermessen.

Als Vorteil der 20F-Methode erweist sich, dass die Lichthomogenität nur über einen Winkelbereich von etwa 6° gegeben sein muss, da die Lichtquelle mindestens 300 m zu den Teleskopen entfernt ist. Abb. 5.8 zeigt, dass das Lichtfeld in einem Winkel von 6° um das Maximum innerhalb der Fehlerbalken homogen ist. Sowohl Halogenlampe als auch LEDs können als Lichtquellen benutzt werden. Zusammenfassend zeigen die Abschätzungen, dass die Reflektivität von Teleskopen mit dem 20F-Verfahren ermittelt werden kann.

5.2.3 Signalübertragung

Wie dem Schema Abb. 5.12 zu entnehmen ist, müssen bei der Signalübertragung lange Strecken überbrückt werden. Die praktikabelste Art der Signalübertragung geschieht durch 500 m lange BNC- oder Lemo-Kabel. Ingesamt werden 3 Signalkabel plus ein Stromversorgungskabel benötigt. Ein Kabel führt von der auf dem Kameradeckel montierten Messdiode zum Lock-In Verstärker im Kontrollgebäude. Die Halogenlampe bzw. LED, in einer Entfernung von 300 m zu den Teleskopen, werden durch ein Stromkabel mit der Versorgungsspannung betrieben. Jeweils ein Kabel überträgt das Signal der Kontrolldiode und die Pulsfrequenz. Für die 2F-Messungen waren bisher nur Kabel mit max. 10 m Länge notwendig, die keinen Einfluss auf die Signalqualität haben. Durch Verwendung 500 m langer Kabel ist nicht auszuschliessen, dass die Signale während der Laufzeit im Kabel verändert werden. Es wurde untersucht wie sich Strom-, Spannungs- und Pulssignal verhalten wenn diese über ein 500 m langes Kabel übertragen werden.

Das Pulssignal ist ein Sinus- oder TTL-Signal mit einer Amplitude von mindestens 3 V bis maximal 5 V . Für die Messungen wurde die Sinusspannung direkt vom Lock-In Verstärker erzeugt. Zur Amplitudenmessung diente ein Oszilloskop. Es wurde die Amplitude nach einem 3 m und einem 500 m BNC Kabel gemessen. Die Frequenz wurde im Bereich 100 Hz bis 5 kHz durchgefahren. Innerhalb der Messgenauigkeit war kein Unterschied in der Amplitude zwischen beiden BNC Kabeln zu messen. Für den LED Treiber reicht eine Mindestspannung von 3V .

Für die Übertragung kann daher ein BNC-Kabel benutzt werden. Die Messungen des Photostromes erfolgten mit dem Lock-In Verstärker und der LED als Lichtquelle. Die Photodiode wurde in den direkten Lichtstrahl gestellt und in einem Frequenzbereich von 100 Hz bis 8 kHz die Intensität nach einem 3 m BNC, 300 m Lemo und 500 m BNC gemessen, s. Abb. 5.14. Die gemessene Intensität variiert sehr stark mit der Pulsfrequenz. Weiterhin sind die Intensitäten von der Länge und der Bauart der Kabel abhängig. Der Photostrom ist damit

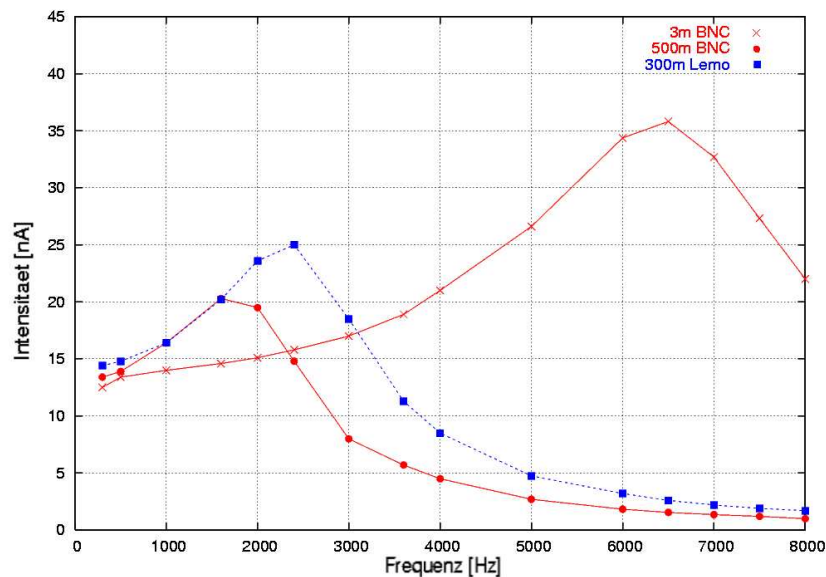


Abbildung 5.14: Signalverhalten des Diodenstromes für BNC und Lemo Kabel; Das Signal ist stark anhängig von Kabelart, Kabellänge und Pulsfrequenz

bei einer Kabellänge von 500 m als Messgröße ungeeignet. Das Ergebnis der Oszilloskopmessungen des Pulssignals war, dass die Spannungsamplitude von der Kabellänge unabhängig war. Die Lösung ist daher, den Photostrom in eine Spannung umzuwandeln und dann per Kabel weiterzuleiten. Es musste noch gezeigt werden, dass neben der Amplitudenunabhängigkeit auch die Frequenz keinen Einfluss auf die Spannungsamplitude besitzt.

Für die Umwandlung des Photostromes in eine Spannung wurde der bestehende Strom-Spannungs-Wandler benutzt. Die Frequenz wurde zwischen 200 Hz und 6 kHz variiert und die Intensität nach einem 3 m BNC, 300 m Lemo und 500 m BNC gemessen. Abb. 5.15 zeigt, dass das Spannungssignal, für Frequenzen geringer 5 kHz, innerhalb der Fehlerbalken unabhängig von der verwendeten Kabellänge und -art war. Es zeigte sich aber eine Abhängigkeit der Intensität von der Frequenz. Dieser Effekt ist jedoch bedeutend weniger stark ausgeprägt wie bei der Stromsignalübertragung. Bis zu einer Frequenz von 1.5 kHz steigt die Intensität und sinkt nach einem Maximum bei 1.5 kHz kontinuierlich. Der Intensitätsunterschied im Bereich von 1 kHz bis 3 kHz beträgt jedoch weniger

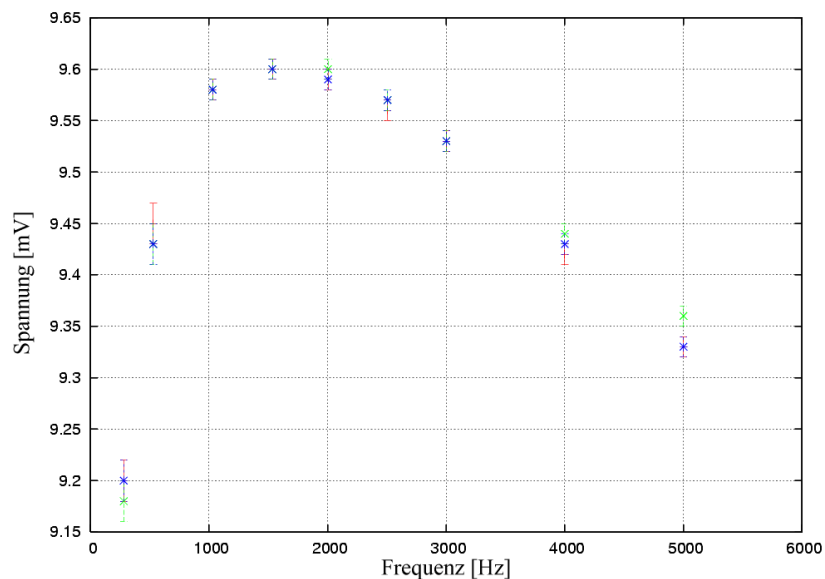


Abbildung 5.15: Darstellung des SSW-Spannungssignals nach einem 3 m BNC (rot Punkte), 500 m BNC (grüne Punkte) und 300 m Lemo (blaue Punkte) Kabel. Zwischen 1 kHz und 3 kHz ist die Intensität von der Frequenz unabhängig. Die Signalamplitude ist nicht mehr von der Kabelart und -länge abhängig.

als 1%. Die Frequenzabhängigkeit hat aber keinen Einfluss auf die Messungen, solange während der Messung die Pulsfrequenz nicht geändert wird. Wird der Photostrom vor dem Kabel in eine Spannung umgewandelt, so kann das Signal störungsfrei übertragen werden.

Bei den Spiegelmessungen werden Intensitäten von wenigen pA bis zu maximal $1 \mu\text{A}$ gemessen. Der Strom-Spannungs-Wandler muss diesen gesamten dynamischen Bereich verarbeiten und linear umwandeln können. Für eine feste Frequenz wurde der Photostrom durch Ändern der Lampenintensität im Bereich 10 pA bis $1 \mu\text{A}$ variiert. Es wurden der Photostrom vor und die Spannung nach dem Strom-Spannungs-Wandler gemessen. Abb. 5.16 zeigt, dass der SSW über den gesamten Messbereich von 10 pA bis $1 \mu\text{A}$ innerhalb der Messgenauigkeit linear arbeitet. Die Linearität bleibt durch den Schalter unbeeinflusst. Mit diesen Tests wurde gezeigt, dass eine Signalübertragung, des durch den SSW in eine Spannung umgewandelten Photostromes, unbeeinflusst ist. Für die 20F-Messungen werden jeweils für die Messdiode und die Kontrolldiode Strom-Spannungs-Wandler benötigt. Welche der beiden Photodioden gemessen wird, kann über einen elektronischen Schalter bestimmt werden. Um flexibel zu sein wurden Schalterchip und Strom-Spannungs-Wandler in eine kleine Metallbox eingebaut, von denen insgesamt vier Stück gebaut wurden. Die Vereinigung von Schalter und Strom-Spannungs-Wandler hat den Vorteil, dass bei einem Defekt eine andere Box einfach eingesetzt werden kann, unabhängig davon ob die Box gerade als Strom-Spannungs-Wandler

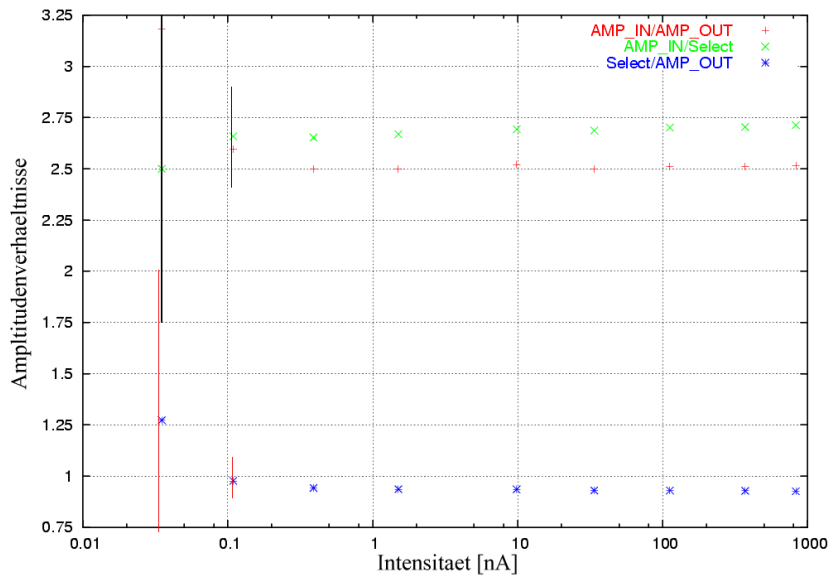


Abbildung 5.16: Linearität des Strom-Spannungs-Wandlers (SSW) und Schalter, $Amp_{in}[nA] = \text{Photostrom}$, $Amp_{out}[mV] = \text{Spannungssignal}$, $Select[mV] = \text{Spannungswert nach dem Schalter}$

oder Schalter in Benutzung war.

Für die Messdiode in der Kameraebene ist keine Stromversorgung für den Strom-Spannungs-Wandler verfügbar. Die einzige Möglichkeit der Stromversorgung ist durch eine Batterie. Die Schaltung wurde so aufgebaut, dass eine Stromversorgung der Elektronik wahlweise durch ein Netzteil oder eine 9 V Blockbatterie möglich ist. Für eine Messung ist es entscheidend, dass die Batterie über den Zeitraum von mindestens 2 h Strom für den SSW liefert. Wie lange eine Batterie genügend Strom liefert wurde im Labor gemessen. Zwei Photodioden mit SSW befanden sich direkt vor der gepulsten LED. Ein SSW wurde mit Batterie, der zweite SSW mit einem Netzteil betrieben. Die Batteriespannung konnte durch einen Spannungseingang am Lock-In Verstärker gemessen werden. Abb. 5.17 zeigt die Batteriespannung als Funktion der Zeit, Abb. 5.18 die Intensitäten in Abhängigkeit der verstrichenen Zeit. Werden Abb. 5.17 und Abb. 5.18 kombiniert, so ergibt sich eine maximale Betriebsdauer von 6 h - 7 h. Die Photodiode mit Batteriebetrieb des SSW zeigt eine sehr geringe Abnahme der Lichtintensität von 0.2%. Da die Kontrolldiode keine Abnahme zeigt, lässt dies auf einen sehr kleinen Einfluss der Batteriespannung auf das Messsignal schließen, der aber vernachlässigt werden kann.

Ein Kompromiss muss bei der Umwandlung des Strom- in ein Spannungssignal eingegangen werden. Der Lock-In Verstärker ist bei Spannungsmessungen weniger empfindlich als bei Strommessungen. Die Spannungsmessbereich beträgt 1 nV - 1 V, der Strommessbereich 1 fA - 1 μA . Der optimale Verstärkungsfaktor würde

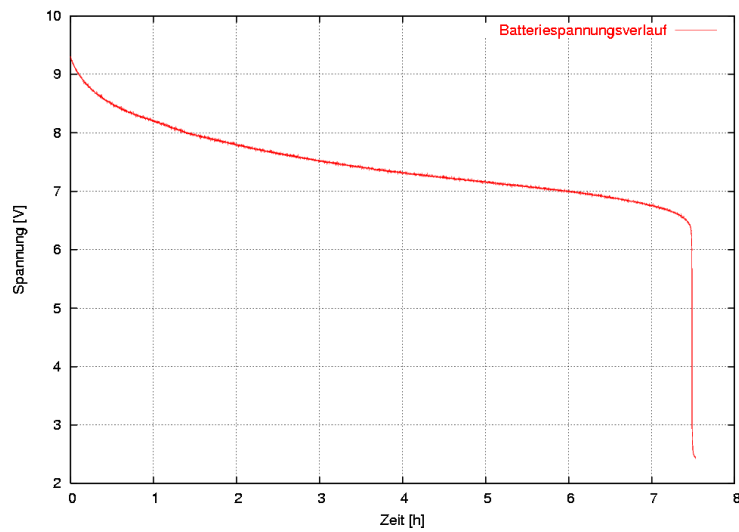


Abbildung 5.17: zeitlicher Verlauf der Batteriespannung während einer Langzeitmessung mit LED; sinkt die Spannung unter 6.5 V, fällt bricht die Batteriespannung ein

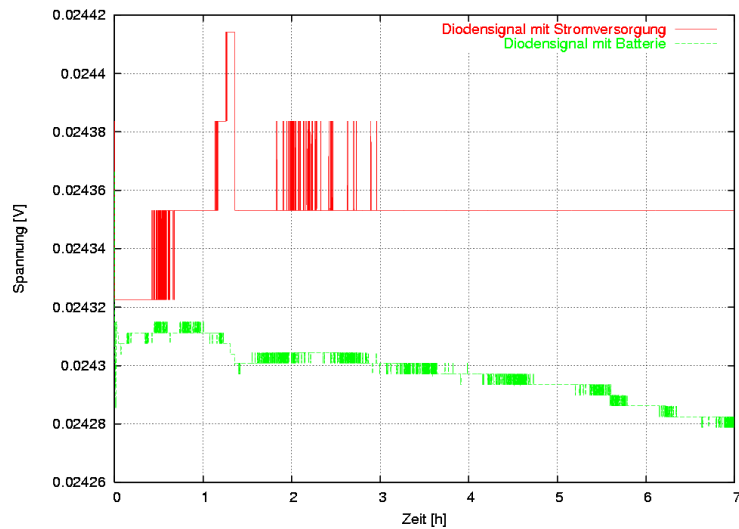


Abbildung 5.18: Messsignal in Abhängigkeit der Batteriespannung; die obere Kurve entspricht der Kontrolldiode, deren SSW mit einem mit Netzteil betrieben wurde; die untere Kurve zeigt die Intensität der Messdiode mit batteriebetriebenenem SSW.

10^6 betragen, dann würde der Spannungsmessbereich voll ausgenutzt werden. Im realen Betrieb wird diese Verstärkung nicht erreicht werden.

Die maximale erreichbare Ausgangsspannung des SSW ist 5 V, d.h. bereits bei einem Eingangsstrom von $5 \mu\text{A}$ würde der SSW sättigen. Die Streulichtintensität

ist in der Regel aber grösser als mehrere $10 \mu\text{A}$, so dass mit einer so grossen Verstärkung nicht gearbeitet werden kann. Um bereits vor dem SSW einen Teil des Streulichtes zu blocken und damit den Eingangsstrom zu verringern, könnte prinzipiell einen Hochpassfilter eingesetzt werden. Wie sich aber zeigte, s. Abb. 5.19, arbeitete der SSW dann nicht mehr linear und die Spannung war zusätzlich von der Intensität des Streulichtes abhängig. Als weiterer Faktor führt eine geringe

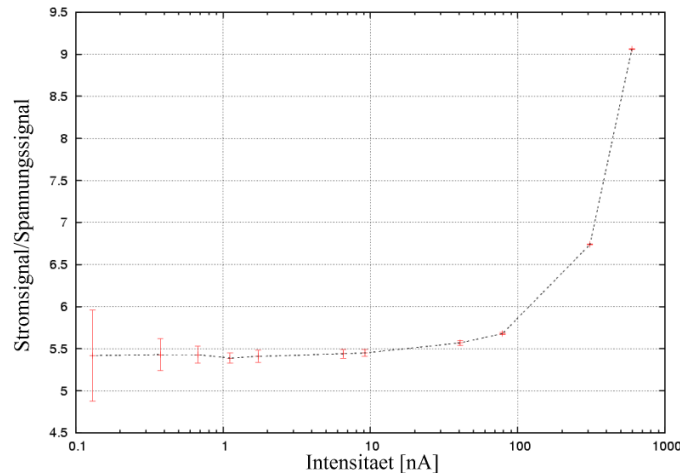


Abbildung 5.19: Spannungssignal des SSW als Funktion des Photostromes bei Vorschalten eines Kondensators

Potentialdifferenz an den Operationsverstärkereingängen(OPV) des SSW, das sog. Offset, von üblicherweise wenigen μV bei zu hoher Verstärkung ebenfalls zu einer Sättigung des OPV. Dieses Offset kann zwar durch Einbau von Widerständen fast bis auf null verringert werden, die Spannungsamplitude des gepulsten Lichtes ist dann jedoch vom Untergrundstromanteil abhängig. Als Konsequenz wurde daher die Schaltung des SSW nicht weiter verändert und die Verstärkung so eingestellt, dass diese möglichst gross ist und der SSW im linearen Bereich betrieben wird. Bei einem Photostrom von $1 \mu\text{A}$ beträgt die Spannungsamplitude $0,364 \text{ V}$.

Zusammenfassend kann man sagen, dass die mit einem Strom-Spannungs-Wandler in eine Spannung umgewandelten Photoströme störungsfrei über 500 m lange BNC Kabel übertragen werden. Der maximale Spannungsmessbereich des Lock-In Verstärkers wird nicht ausgenutzt, da die Verstärkung des SSW durch die Streulichtintensität und das Offset begrenzt ist. Die Intensität in der Kameraebene wird dennoch einen Faktor 100 über der Messgrenze des Lock-In Verstärkers liegen.

Kapitel 6

Messaufbau in Namibia und Ergebnisse

6.1 2F-Messungen

Nach der Überprüfung, dass alle Elektronik und Bauteile nicht durch den Flug beschädigt waren, wurde mit dem Aufbau des 2F-Messstandes begonnen. Es wurde zuerst mit der 2F-Methode gemessen, da hier der Messaufbau sehr gut verstanden ist.

6.1.1 Aufbau des 2F Messstandes



Abbildung 6.1: Aufbau des Messtandes

Bevor mit dem eigentlichen Messungen begonnen werden konnte, musste geklärt werden, wie der Transport des Scantisches und der Elektronik zu den Teleskopen erfolgen sollte. Durch den sandigen Untergrund und das hohe Gewicht des Scantisches kam nur ein Transport mittels eines Gabelstaplers in Frage. Der gesamte Messaufbau wurde zur einfacheren Handhabung und zum Schutz der Elektronik in eine Gitterbox eingebaut (Abb. 6.1). Dadurch kann der gesamte Messaufbau schnell und einfach von einem Teleskop zum nächsten transportiert werden. Im nächsten Schritt wurde die Umgebung der Teleskope gesichtet, um die Positionen für den Messaufbau zu markieren.

Das erste zu messende Teleskop war CT3, da es als erstes gebaut wurde und hier die grösste Abnahme der Reflektivität zu erwartet ist. Das erste grobe Ausrichten des Teleskopes erfolgte mit der Handsteuerung in den frühen Abendstunden. Aus der Höhe der Drehachse, um welche sich das Teleskop neigt und der geforderten Entfernung des Messaufbaus zum Teleskopmittelpunkt von 30 m ergibt sich ein Altitudewinkel von etwa -20° . Die Entfernung des 2F-Messpunktes von 30 m zum Teleskopmittelpunkt wurde mit einem Disto Laserentfernungsmessgerät der Firma Leica bestimmt. Dabei wurde die Entfernung zu einem inneren Spiegel gemessen. Da es bei Laserentfernungsmessungen an Spiegeln zu abweichenden Werten kommen kann, wurde zusätzlich die Entfernung zur Kamerarückseite bestimmt. Aus den Abmessungen der Kamera und dem Abstand zwischen Kamera und Teleskopmittelpunkt lässt sich die geforderte Distanz zur Kamerarückseite bestimmen, so dass sich insgesamt 30 m ergeben. Die Distanz wurde auf wenige cm genau bestimmt. In dieser Entfernung wurde die Gitterbox mit LED Lampe und Scantisch aufgestellt und das Teleskop ausgeleuchtet. Der Lichtfleck des reflektierten Lichtes war bei Tageslicht nicht mit dem bloßen Auge zu erkennen, da die LED zu schwach ist. Neben der LED Lampe wurden Halogenstrahler aufgestellt, die das Teleskop zusätzlich ausleuchteten. Damit war der Lichtfleck sichtbar und das Teleskop wurde grob ausgerichtet. Das genaue Ausrichten des Teleskops mit der LED ohne Halogenscheinwerfer musste auf die Nacht verschoben werden, da erst dann der Lichtfleck sehr gut zu erkennen war. Das Teleskop ist ausgerichtet, wenn das reflektierte Licht der Spiegel auf die Messdiode zentriert ist, welche auf dem Scantisch montiert ist.

Der Lichtfleck hatte in vertikaler Richtung eine fast 100% grössere und in horizontaler Richtung um 50% grössere Ausdehnung, als in der Monte-Carlo-Simulation berechnet [9], s. Abb. 6.2 rechts, und war damit grösser als der Fahrweg des Scantisches. Für die Monte-Carlo-Simulation wird eine imaginäre Lichtquelle in 30 m Entfernung zum Teleskopmittelpunkt benutzt. Das Teleskop zeigt dabei senkrecht nach oben. Für diese Position wird die Spiegelträgerdeformation berücksichtigt und die Spiegel sind optimal ausgerichtet. Die Asymmetrie in den Daten des Lichtflecks kommt durch eine Deformation des Spiegelträgers zustande, da das Teleskop für die Messungen 20° unter den Horizont geneigt wird und die Spiegel dann leicht dejustiert sind. Erst mit einer Verringerung des Abstandes auf 29.85 m war der Lichtfleck annähernd symmetrisch und konnte später vermessen werden, s. Abb.

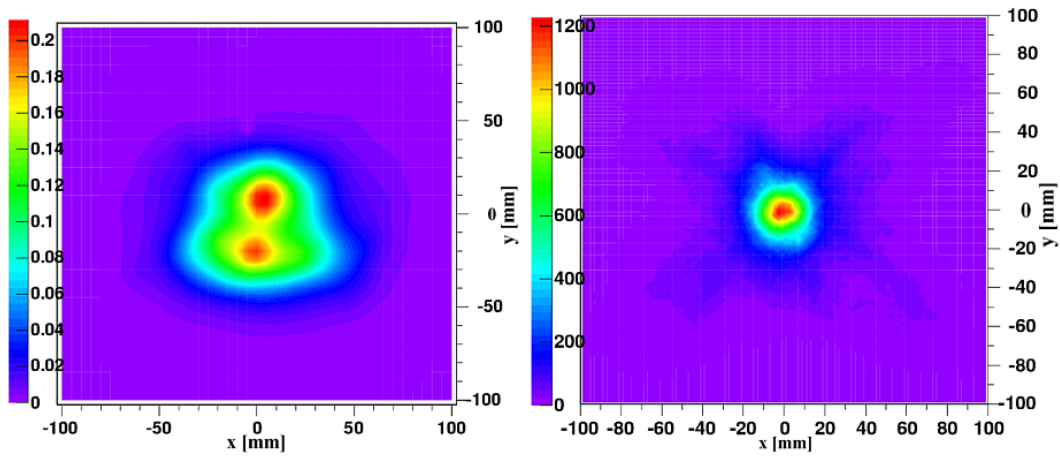


Abbildung 6.2: Gemessene Intensitätsverteilung eines Lichtspots bei CT2(links), Monte-Carlo-Simulation [9] eines Lichtspots(rechts)

6.2 links.

Zur Ausrichtung der LED Lampe wurde an der Kamerarückseite eine Photodiode befestigt. Die LED wurde einmal in vertikaler und einmal in horizontaler Richtung um max. $\pm 20^\circ$ geneigt und der Intensitätsverlauf mit der Photodiode und dem Lock-In Verstärker gemessen. Die Messungen waren konsistent mit den in Heidelberg durchgeführten Messungen. Das Intensitätsmaximum der LED Lampe wurde auf den Teleskopmittelpunkt eingestellt und die zugehörigen Winkelwerte notiert. Dadurch ist es möglich, die LED Lampe reproduzierbar auszurichten.

Vor Beginn einer Messung ist eine Referenzmessung der Lichtintensität im direkten Lichtstrahl der LED mit der Messdiode notwendig. Dazu wird die LED Lampe waagrecht ausgerichtet. An der Gitterbox ist eine Aluminiumschiene angebracht, auf der sich in einem definiertem Abstand eine Halterung für die Messdiode befindet. Dadurch ist die Reproduzierbarkeit der Referenzmessung gewährleistet. Die Abstandsmessung zwischen Referenzposition und LED Lampe erfolgt mit dem Disto. Die Referenzintensität wird mit der Messdiode und dem Lock-In Verstärker gemessen. Nach der Referenzmessung wird die LED Lampe wieder auf das Teleskop gerichtet, die Messdiode auf dem Scantisch befestigt und der Lichtfleck mit einer Schrittweite von 1 cm abgefahren.

Neben der Einschränkung, dass die Teleskope mit der LED nur bei Nacht ausgerichtet werden können, sind Tagesmessungen aus einem weiteren Grund nicht möglich. Die Teleskope müssen stets mit der Spiegelrückseite zur Sonne stehen, weshalb die Sonne direkt auf Photodiode scheint. Ohne eine weitere Abschattung sättigt die Messdiode aber sofort und eine Messung ist nicht möglich. Neutralfilter sind nicht einsetzbar, da diese eine starke Abhängigkeit vom Einfallswinkel zeigen. Die Vermessung des Neutralfilters wurde erst direkt in Namibia durchgeführt, da bei den Messungen in Heidelberg ein Neutralfilter nicht nötig war. Abb. 6.3

zeigt die Intensität nach einem Neutralfilter als Funktion des Einfallswinkels, normiert auf die Photodiode ohne Filter. Wie zu sehen ist, wird das Licht mit grösser werdendem Einfallswinkel immer stärker absorbiert. Das bedeutet für die Reflektivitätsmessungen, dass das reflektierte Licht der äusseren Spiegel stärker absorbiert wird als für innere Spiegel und dadurch falsche Reflektivitäten bestimmt würden.

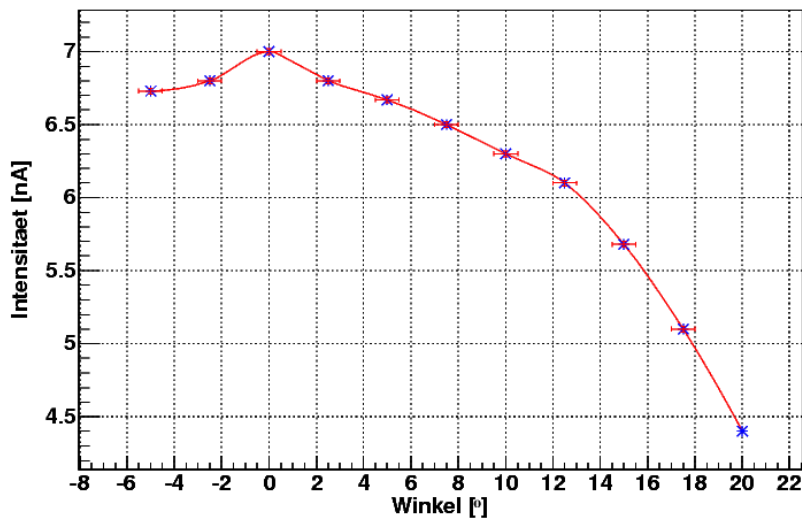


Abbildung 6.3: Abhängigkeit der Intensität vom Einfallswinkel hinter einem Neutralfilter, Firma unbekannt

6.1.2 Ergebnisse

Für die Messungen wurde nur die LED Lampe benutzt, da die Intensitäten höher waren als die der Halogenlampe und keine Filter gewechselt werden mussten. Die Reflektivität von CT3 wurde in den drei Wellenlängenbereichen zu $(62 \pm 3)\%$ bestimmt. Die Reflektivitätswerte musste jedoch um 7.5% nach oben korrigiert werden, da sich herausstellte, dass Licht an der Aluminiumschiene, welche bei der Referenzmessung benutzt wird, reflektiert wird und somit zu einem überhöhtem Referenzwert führt. Die Schiene wurde für die nachfolgenden Messungen mit schwarzem Stoff abgedeckt.

Es wurde zusätzlich eine Reihe systematischer Tests durchgeführt, um weitere Beeinflussungen des Messaufbaus auszuschliessen. Reflektivitätsmessungen mit um eine mehrere Grad in vertikaler Richtung gedrehte LED Lampe zeigten innerhalb der Messfehler keinen Unterschied. Die Reflektivität mit ausgerichteter Lampe war $(69.1 \pm 3)\%$ und die Reflektivität mit einer um 3° gedrehten Lampe war $(69.2 \pm 3)\%$. Eine Drift der LED Leistung während der Messungen wurde durch

Messung der Referenzintensität vor und nach jeder Messung ausgeschlossen. Das Verwenden verschiedener Photodioden hatte ebenfalls keinen Einfluss auf die Reflektivitätswerte. Keine Änderung zeigte sich ebenfalls bei einer Verringerung der Schrittweite von 1 cm ($R=69.2\pm 3$) auf 0.5 cm ($R=69.2\pm 3$)%.

Mit diesem Aufbau wurden nacheinander die Reflektivitäten aller 4 Teleskope bestimmt. Die Berechnung wurde mit derselben Methode wie für die Einzelspiegelmessungen durchgeführt, siehe Abschnitt 4.1. Die beleuchtete Spiegelfläche, welche in die Berechnung eingeht, wurde aus einer Monte-Carlo-Simulation [9] zu 80.2 m^2 bestimmt.

Aus Tabelle 6.1 kann man ablesen, dass alle Teleskope eine Reflektivität im Bereich von $(70\pm 2)\%$ besitzen. Nur CT1 besitzt bei 470 nm eine signifikant höhere Reflektivität von 76.9%. Innerhalb der Messgenauigkeit von 2.5% ist ausser bei CT1 bei 470 nm kein signifikanter Unterschied zwischen den Teleskopen in der Reflektivität zu erkennen. Tabelle 6.2 zeigt die Auflistung der Fehler, die in die Berechnung der Reflektivität eingehen. Da ein absoluter Fehler in der Entfernungsbestimmung zwischen Teleskop und LED Lampe, sowie die Referenzentfernung zwischen LED Lampe jeweils doppelt zum relativen Fehler beitragen, ist hier besonders Wert auf eine präzise Messung zu legen. Das Ausrichten der Lampe ist auf 1° genau. Der Fehler auf die Photodiode ist durch die Nichtlinearität zwischen Lichtintensität und Photostrom zu 1% gegeben. Vom Hersteller wird ein Fehler von 1% auf die Strom-/Spannungsmessung des Lock-In Verstärkers angegeben.

Nimmt man eine mit der Zeit linear abnehmende Reflektivität an, wäre zu erwarten gewesen, dass CT3 die geringste Reflektivität und das neueste Teleskop CT1, die höchste Reflektivität aufweist. Eine mögliche Erklärung ist, dass der Effekt der zur Verringerung der Reflektivität führt, innerhalb kurzer Zeit nach der Spiegelmontage eintritt und dann in eine Sättigung übergeht. Vielleicht legt sich schnell eine Staubschicht auf die Spiegel, deren Stärke über die Zeit konstant bleibt.

Teleskop	Alt/Az	weiss (5500K)	470 nm	530 nm	Bauzeit
CT1	99.646/18.937	70.9	76.9	72.1	10/2003
CT2	273.35/-19.6	68.5	69.2	69.9	10/2002
CT3	98.663/-18.947	69.1	69	71.3	8/2001
CT4	91.499/-18.02	71.7	71.8	71	8/2003

Tabelle 6.1: Reflektivität der Teleskope mittels Bestimmung der 2F Methode in %

Der Lichtfleck des reflektierten Lichtes wurde immer nur im Abstand der doppelten Brennweite abgefahren. Vergrössert man nun den Abstand zum Teleskop, so wird der Lichtfleck aufgeweitet. Abb. 6.4 zeigt eine CCD Aufnahme des reflektierten Lichts in 31 m, dass auf eine Mattscheibe fällt. Die LED Lampe befand sich in 30 m Entfernung zum Teleskop. Der Lichtfleck hat eine so grosse Ausdehnung,

	Messgrösse	Absolute Fehler	Relative Fehler	Einfluss auf R
Teleskopentfernung	Lichtquelle-Spiegel	0.1 m auf 30 m	0.3%	0.6%
Referenzentfernung	Lichtquelle-Diode	0.5 cm auf 170 cm	0.3%	0.6%
Lampe	Inhomogenität	-	0.5%	0.5%
Detektor	Photodiode+ Lock-In Verstärker	-	<2%	<2%
Total	-	-	-	2.5%

Tabelle 6.2: Die Fehler für die Abstandsmessungen zwischen Lichtquelle, Diode, Teleskop wurden abgeschätzt. Die Inhomogenität des Lichtes ist durch die Genauigkeit der Lampenausrichtung gegeben. Auf die Newport Photodioden und den Lock-In Verstärker wurden vom Hersteller ein Fehler <2% angegeben. Der Gesamtfehler von $\sim 2.5\%$ ergibt sich durch quadratische Summation der Einzelfehler.

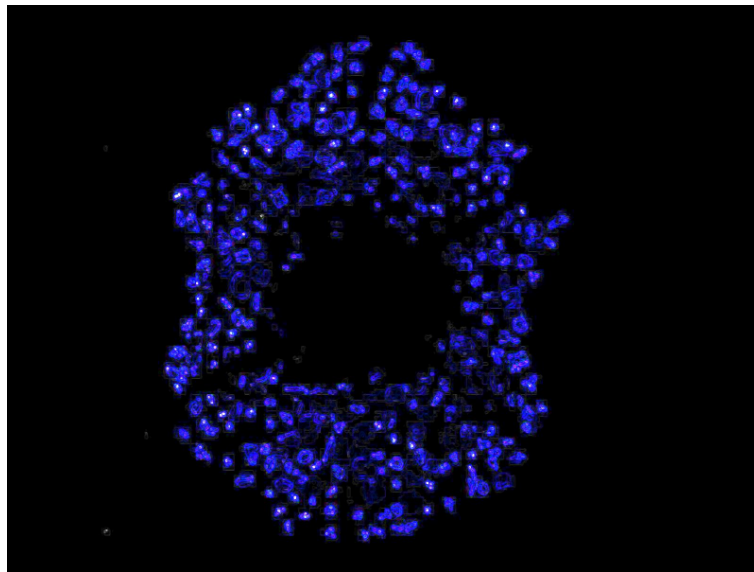


Abbildung 6.4: CCD Aufnahme in einer Entfernung von 31 m zum Teleskop. Einzelspiegel sind sehr gut erkennbar. Horizontale Ausdehnung etwa 30 cm - 35 cm

dass bereits einzelne Spiegel auflösbar sind. Das vollständige Abfahren des Lichtflecks ist durch den geringeren Verfahrensweg des Scantisches leider nicht möglich. Der Lichtfleck könnte aber in Quadranten unterteilt werden, die separat abgefahren und später wie in einem Mosaik zusammengesetzt werden würden. Das Abfahren

des gesamten Lichtflecks würde mindestens 3 h bei einer Schrittweite von 0.5 cm in Anspruch nehmen. Dieses Verfahren bietet die Möglichkeit die Reflektivität jedes Spiegels zu bestimmen und so direkt zu erkennen, ob Spiegel ausgetauscht werden müssten.

6.2 20F-Messung

Um die Reflektivitätswerte der 2F-Messungen mit Messwerten eines weiteren Messverfahren zu vergleichen, wurden die Teleskope zusätzlich mit der 20F-Methode vermessen.

6.2.1 Aufbau des 20F Messtandes

Bevor mit dem Aufbau begonnen werden konnte, musste eine Stelle in etwa 300 m Entfernung von den Teleskopen gefunden werden, von der aus die Teleskope ohne Abschattung durch Sträucher und Bäume beleuchtet werden. Es wurde eine Stelle 300 m entfernt von CT1 gewählt, von der aus CT1 und CT4 sowie CT2 und CT3 entlang der Sichtlinie nah beieinander standen. Zur Bestimmung der Entfernung zwischen LED und Teleskop wurde der Disto benutzt. Damit wurde die Entfernung zwischen Kamerarückseite und LED gemessen. Die Gesamtentfernung ergibt sich aus der gemessenen Entfernung, der Länge der Kamera und dem Abstand der Kamera zum Teleskopmittelpunkt. Die LED Lampe wurde auf einem 3-Bein-Gestell montiert und vom Kontrollgebäude zwei 500 m BNC Kabel, sowie ein Stromversorgungskabel zur LED verlegt. Zusätzlich wurden Halogenscheinwerfer aufgestellt, da die Intensität der LED Lampe zu schwach sein würde um den Lichtfleck in der Kameraebene zu erkennen und das Teleskop auszurichten. Das dritte 500 m BNC Kabel verlief vom Kontrollgebäude zum ersten zu messenden Teleskop, CT1. Die Kontrolldiode wurde auf einem Stativ vor der LED befestigt, die Messdiode mit Klebeband auf dem Kameradeckel. Um zur Referenzmessung die Messdiode nicht immer zwischen Teleskop und LED tragen zu müssen, waren im Labor vorher beide Photodioden im gleichen Lichtfeld der LED gegeneinander kalibriert worden. Aus dem gemessenen Intensitätswert der Kontrolldiode kann dann die Referenzintensität berechnet werden. Abb. 6.5 zeigt den schematischen Aufbau der ersten Messung an CT1. Es sind die verwendeten Kabel, Standort der Lichtquelle, sowie die relativen Positionen zu einander eingetragen

Mit Einbruch der Dämmerung konnte mit dem Ausrichten des Teleskops begonnen werden. Dazu wurden die Halogenscheinwerfer und LED Lampe angeschaltet, so dass der Lichtfleck auf dem Kameradeckel gut zu erkennen war. Das Teleskop wurde so ausgerichtet, dass der Lichtfleck mittig positioniert war. Danach wurden die Halogenscheinwerfer ausgeschaltet, die Intensität der LED Lampe mit der Kontrolldiode gemessen und daraus die Referenzintensität bestimmt. Für die Messungen wurde stets die weiße LED benutzt, da diese die höchste Lichtleistung

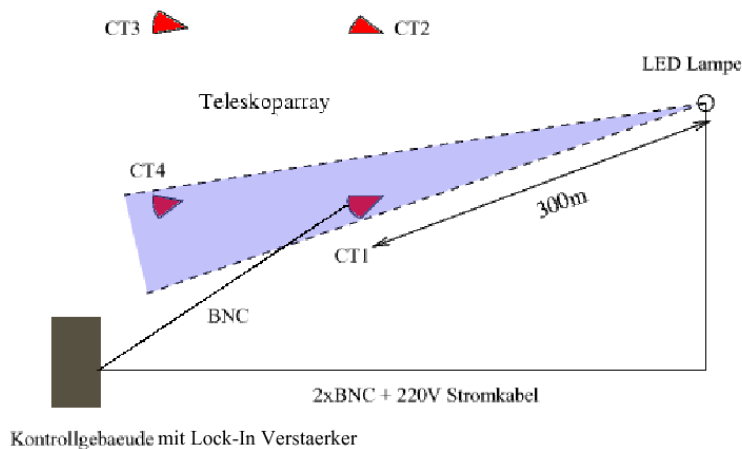


Abbildung 6.5: schematische Darstellung des 20F-Aufbaus

liefert. Um den späteren Scanbereich festzulegen, wurde der Lichtfleck in einem ersten Grobscan abgefahren. Die Schrittweite in Azimuthrichtung betrug dabei 10 cm, die Altitudegeschwindigkeit 4.5 cm/s. Die Auslesefrequenz des Lock-In Verstärkers betrug 9 Hz.

Aus dem Grobscan wurde der Scanbereich ermittelt und für eine vollständige Vermessung des Lichtflecks die Schrittweite in Azimuthrichtung auf 0.5 cm gesetzt. Das Abscannen des Lichtflecks nahm rund eine Stunde in Anspruch.

Im Gegensatz zur 2F-Methode sind die Lock-In Daten und die Teleskoppositionen in jeweils eigenen Dateien gespeichert. Um jeder Teleskopposition einen Intensitätswert zuordnen zu können, sind in beiden Dateien zu jedem Messwert zusätzlich die Zeit eingetragen. Anhand des Zeitwertes werden beide Dateien miteinander synchronisiert.

Abb. 6.6 zeigt die damit erhaltene 2D-Darstellung des Lichtflecks in der Kameraebene. Man erkennt sehr gut die hexagonale Struktur der Spiegelanordnung. Der innere Teil des Lichtflecks wird durch die Kamera abgeschattet. Weiterhin ist die Abschattung der oberen und unteren Masten zu erkennen. Einzelne Spiegel sind nicht auflösbar, da die Lichtflecke der Spiegel verzerrt sind. Die gemessene Intensitätsverteilung ist grober strukturiert als die Monte-Carlo-Simulation, da die Schrittweiten der Messung nicht beliebig klein gewählt werden können. Die Intensitätsverteilung entlang eines Scans in Altituderichtung zeigt Abb. 6.7. Es sind sehr deutlich Minima und Maxima zu erkennen welche durch die Abbildung einzelner Spiegel entstehen. Durch die Größe jedes individuellen Lichtflecks der Spiegel überschneiden sich diese in der Kameraebene, so dass die Intensität nicht immer auf null sinkt. Zusätzlich wurde ein Ausschnitt der Größe 0.5° mal 1° genauer vermessen. Die Geschwindigkeit in Altituderichtung betrug 2.7 cm/s und die Schrittweite in Azimuthrichtung 0.5 cm. Die rechte Seite der Abb. 6.6 zeigt die Intensitätsverteilung des Ausschnitts.

Für die Reflektivitätsmessungen an CT4 und CT2 wurde die Referenzmessung mit der Messdiode durchgeführt, da nicht ausgeschlossen werden konnte, dass

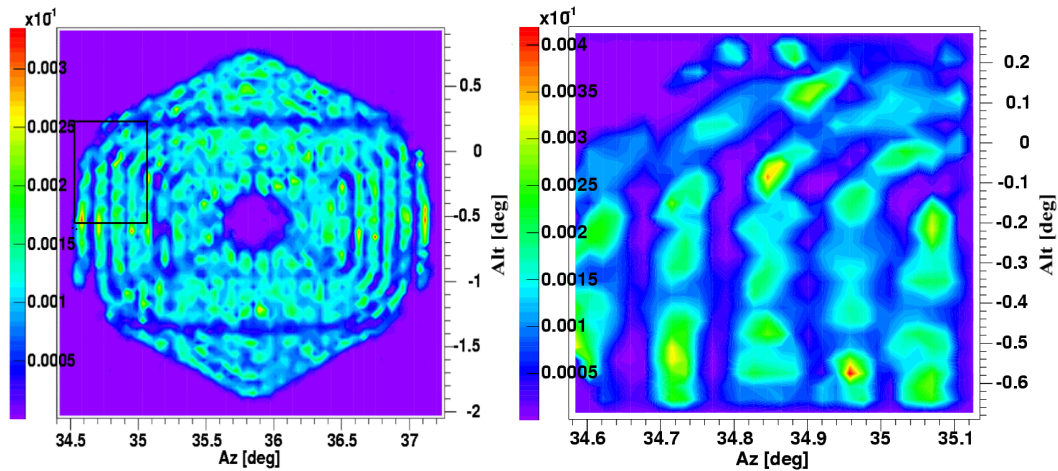


Abbildung 6.6: l. Intensitätsverteilung in der Kameraebene von CT1, r. Feinscan des Teilbereiches

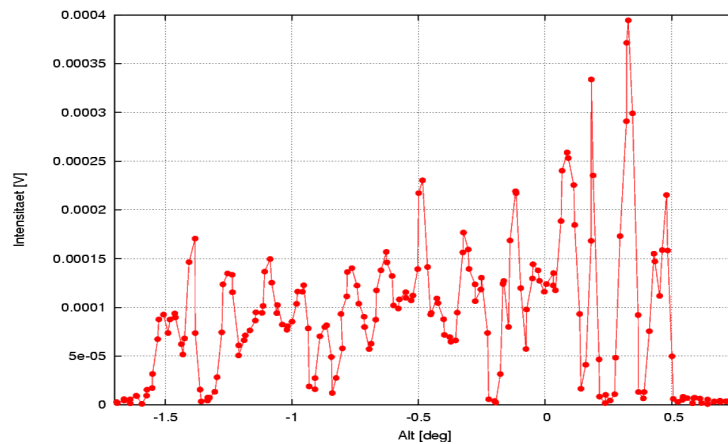


Abbildung 6.7: Intensitätsverteilung entlang eines Scans in Altituderichtung. Sehr gut sind Minima und Maxima zu erkennen welche durch die einzelnen Spiegel entstehen. Die Rauschamplitude beträgt weniger als $10 \mu\text{V}$, zu erkennen für $\text{Alt} > 0,5^\circ$.

die Temperaturschwankung während der Nacht keinen Einfluss auf die Strom-Spannungs-Wandler hatte. CT4 wurde dabei zweimal vermessen, um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu sichern. Anhand der Kontrolldiode konnte eine leichtes Absinken von 1% der LED Leistung nach der ersten Messung festgestellt werden. Die Referenzintensität wurde daher für die zweite Messung an CT4 und für die Messung an CT2 korrigiert.

Bei der Analyse des Rauschens musste festgestellt werden, dass neben dem eigentlichen Messsignal ein zusätzliches periodisches Signal mit Amplituden bis zu $50 \mu\text{V}$ zu messen war. Abb. 6.8 zeigt links die Intensitätsverteilung als Funktion der

Phase für einen Bereich innerhalb des Lichtflecks. Die Werte sind stark um -20° lokalisiert mit einer absoluten Breite von 90° . Die rechte Abbildung zeigt die Phasenverteilung ausserhalb des Lichtflecks. Die Werte sind stark um 70° lokalisiert mit einer absoluten Breite von 100° . Die Ursache dieses Signals konnte nicht gefunden werden. Der Versuch das Signal im Labor mit LED, SSW, Photodioden und Lock-In Verstärker zu reproduzieren blieb ohne Erfolg. Da die Phasenverteilung des Rauschsignals bei Phasenwinkel $>45^\circ$ war, konnte ein Grossteil dieses Rauschens durch eine Phasenbegrenzung von 45° eliminiert werden, zusätzlich wurden alle Intensitätsmesswerte die offensichtlich ausserhalb des Lichtfleckes lagen auf den Wert null gesetzt, s. Abb. 6.8.

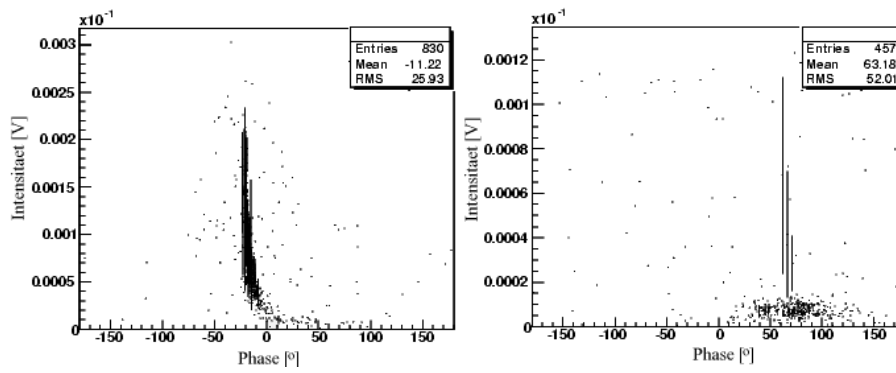


Abbildung 6.8: Phasenverteilung von CT2 mit periodischem Untergrundsignal; innerhalb des Lichtfleckbereiches(links), ausserhalb des Lichtflecks(rechts)

In Tabelle 6.3 sind die Positionen der Teleskope, die Spotgrösse sowie der Scanbereich eingetragen.

Teleskop	Az [°]	Alt [°]	Entfernung [m]	Spotgrösse [cm]
CT1	34.4...37.26	-2.25...0.75	303.7	76
CT2	57.1...59.9	2.17...0.73	308.2	73.3
CT4	37.4...39.6	-0.6...0.6	423.1	57.6

Tabelle 6.3: Daten der Teleskoppositionen, Spotgrösse und Scanbereiche

6.2.2 Berechnung der Reflektivität

Die Berechnung der Reflektivität der Teleskope geschieht mit 2 unabhängigen Verfahren. Das erste Verfahren folgt der gleichen Vorgehensweise wie die 2F-Analyse. Da die Schrittweite in Altitude- bzw. Azimuthrichtung unterschiedlich ist, setzt sich der Skalierungsfaktor aus zwei Schrittweiten zusammen. $step_{alt}[cm]$ ist die Schrittweite in Altituderichtung, $step_{az}[cm]$ die in Azimuthrichtung. Die Schrittweite ergibt sich hierbei aus dem Verhältnis der zurückgelegten Kamerawegstrecke in Altitude- bzw. Azimuthrichtung zur Anzahl der darin enthaltenen Messpunkte. Die Gesamtintensität ergibt sich somit zu

$$I_{meas} = \sum_i I_i \frac{1 \text{ cm}^2}{(step_{alt} \cdot step_{az})} \quad (6.1)$$

Die erwartete Intensität berechnet sich zu

$$I_{exp} = I_{ref} \cdot \left(\frac{d_{ref}}{d_{tel}}\right)^2 \cdot A_{tel} \quad (6.2)$$

I_{ref} ist die Lichtintensität in der Entfernung d_{ref} zur Lichtquelle. A_{tel} ist die Spiegelfläche und d_{tel} die Entfernung zwischen Teleskop und Lichtquelle. Die aus Monte-Carlo-Simulationen [9] berechnete beleuchtete Spiegelfläche beträgt $A_{tel}=96.4 \text{ m}^2$. Das Verhältnis beider Werte ergibt die Reflektivität.

$$R = \frac{I_{meas}}{I_{exp}} \quad (6.3)$$

Das zweite Verfahren zur Reflektivitätsberechnung hat den Vorteil, dass es unabhängig von der Schrittweite ist. Es wird die gemessene mittlere Intensität mit der erwarteten mittleren Intensität verglichen. Im ersten Schritt ergibt sich durch Mittelwertbildung über alle Messwerte eine mittlere Intensität pro cm^2 Diodenfläche, s. Glg. 6.4. Es wird eine Diodenfläche von 1 cm^2 angenommen. Die gemessene Intensität ergibt sich nach Glg. 6.4

$$I_{meas} = \frac{\sum_{i=1}^N I_i}{N} \quad (6.4)$$

Die erwartete mittlere Intensität ergibt sich aus dem Quotienten der gesamten Intensität über das Teleskop und der Fläche, die das Teleskop abgefahren ist, $A_{scan}(\text{m}^2)$ nach Glg. 6.5.

$$I_{exp} = I_{ref} \cdot \left(\frac{d_{ref}}{d_{tel}}\right)^2 \cdot \frac{A_{tel}}{A_{scan}} \quad (6.5)$$

Die Reflektivität berechnet aus

$$R = \frac{I_{meas}}{I_{exp}} \quad (6.6)$$

Die Reflektivitätswerte der Teleskope wurden mit beiden Verfahren bestimmt. Die Ergebnisse unterscheiden sich für dasselbe Teleskop um max. 2%. Eine mögliche Erklärung für den Unterschied ist, dass bei der Berechnung der Reflektivität nur ein Mittelwert der Schrittweite benutzt wird. Die Schrittweite zwischen den Messpunkten schwankt aber bis zu 10% , so dass auf Mittelwert ein Fehler von 1% - 2% gegeben wird. Im zweiten Verfahren hat die abgefahrenen Fläche keine scharfen Konturen. Daher ist die Angabe der Fläche A_{scan} mit einem Fehler von 1% - 2% behaftet. In Tabelle 6.4 sind die berechneten Reflektivitäten der Teleskope eingetragen. CT1 hat eine Reflektivität grösser 80% mit einem grossen Fehler von 6%. Der Fehler entsteht durch den Fehler von 5% bei der Gegenkalibration der Mess- und der Kontrolldiode. Die Reflektivitäten von CT2 und CT4 sind im Bereich von $(72 \pm 1.5)\%$. Die Werte von CT2 und CT4 stimmen innerhalb der Fehler mit den Werten der 2F-Messungen überein. Es ist kein signifikanter Unterschied in der Reflektivität zwischen CT2 und CT4 zu erkennen. Nur die Reflektivität von CT1 stimmt innerhalb der Fehler nicht mit CT3 und CT2 überein. In Tabelle 6.6 sind die Fehlerquellen inklusive Fehlerabschätzung eingetragen. Die Fehler der Entfernungsmessungen können vernachlässigt werden. Der Unterschied in den Ergebnissen der Reflektivitätsberechnung mit beiden Verfahren geht mit einem Fehler von maximal 2% ein. In Tabelle 6.5 sind noch einmal die wichtigsten Messdaten der Teleskope dargestellt.

Teleskop	Reflektivität [%]
CT1	82.8 ± 6
CT2	73.2 ± 3
CT4	$71.6 \pm 3; 71.8 \pm 3$

Tabelle 6.4: Reflektivität der Teleskope

Teleskop	Datum	Gesamtintensität [V]	Referenzintensität [mV]
CT1	27.09. 23:11	1.56	2.83 ± 0.14
CT2	30.09. 00:16	1.52	2.62 ± 0.01
CT4	29.09. 19:35	1.61	2.74 ± 0.01
CT4	29.09. 20:41	1.53	2.69 ± 0.01

Tabelle 6.5: Messdaten der Teleskope. Die Gesamtintensität ist auf die Entfernung von CT1 skaliert.

	Messgrösse	Absolute Fehler	Relative Fehler	Einfluss auf R
Teleskop-entfernung	Lichtquelle-Spiegel	0.1 m auf 300 m	0.03%	0.06%
Referenz-entfernung	Lichtquelle-Diode	0.5 cm auf 340 cm	0.15%	0.15%
Lampe	Inhomogenität	-	0.5%	0.5%
Detektor	Photodiode+ Lock-In Verstärker	-	<2%	<2%
SSW	Linearität	-	0.5%	0.5%
SSW	Gegenkalibration, nur bei CT1	0.14 mV bei 2.83 mV	5%	5%
Analyse	Differenz der beiden Analyseverfahren	-	<2%	<2%
Total CT2,CT4	-	-	-	3%
Total CT1	-	-	-	6%

Tabelle 6.6: Die Fehler für die Abstandsmessungen zwischen Lichtquelle, Diode, Teleskop wurden abgeschätzt, sind aber vernachlässigbar gering. Die Inhomogenität des Lichtes ist durch die Genauigkeit der Lampenausrichtung gegeben. Auf die Photodioden und den Lock-In Verstärker wurden vom Hersteller ein Fehler <2% angegeben. Der Fehler in der Analyse ist durch die Abweichung der Ergebnisse innerhalb von 2% gegeben. Der Gesamtfehler von ~3% ergibt sich durch quadratische Summation der Einzelfehler.

6.3 Vergleich der 2F/20F-Messungen

Teleskop	R[%] der 2F-Messungen mit weisser LED	R[%] Mittelwert aller LED der 2F-Messungen	R[%] der 20F-Messungen
CT1	70.9 ± 3	73.3 ± 3	82.8 ± 6
CT2	68.5 ± 3	69.2 ± 3	73.2 ± 3
CT3	69.1 ± 3	69.8 ± 3	-
CT4	71.7 ± 3	71.5 ± 3	$71.6 \pm 3; 71.8 \pm 3$

Tabelle 6.7: Reflektivität der Teleskope mittels Bestimmung der 2F- und 20F-Methode

Tabelle zeigt in der zweiten Spalte die Reflektivitätswerte der Einzelmessungen mit dem 2F-Messaufbau mit der weissen LED. Die dritte Spalte ist der Mittelwert der Einzelmessungen der drei verschiedenfarbgen LEDs für jedes Teleskop. In der

vierten Spalte sind die ermittelten Reflektivitätswerte mit dem 20F-Messaufbau eingetragen. Schaut man sich die Reflektivitäten für CT1 und CT4 an, so sieht man, dass diese Werte im Mittel 1% - 2% über den Werten von CT2 und CT3 liegen. CT1 und CT4 sind die neuesten Teleskope. Der Reflektivitätswert von 82.8% von CT1 mit der 20F-Methode liegt über den Werten die mit der 2F-Methode gemessen wurde. Den Werten der 2F-Messung ist mehr Vertrauen zu geben, da bei diesem Messaufbau die Fehler besser verstanden sind. Innerhalb der Messfehler stimmen die Reflektivitäten beider Messverfahren für CT2 und CT4 überein. CT4 wurde zweimal vermessen. Wie zu sehen, ist die Reproduzierbarkeit der Messungen gewährleistet. Insgesamt sind die Reflektivitäten der Teleskope im Mittel 10% geringer als die Reflektivität direkt nach Spiegelmontage. Als Kriterium galt, dass die Reflektivität der Spiegel im Neuzustand mehr als 80% betragen muss.

Kapitel 7

Zusammenfassung

7.1 2F-Messungen an Einzelspiegeln

Der bestehende 2F-Messaufbau zur Charakterisierung von Einzelspiegeln wurde erweitert, um Messungen bei Tageslicht durchführen zu können. Dazu wurden ein optischer Pulsformer und Lock-In Verstärker in den Messaufbau integriert. Es wurden zahlreiche systemtische Untersuchungen durchgeführt und die Genauigkeit der Bestimmung der Reflektivität und Winkelauflösung zu 3% ermittelt. Mit diesem Messaufbau wurden hexagonale Spiegel mit einer Brennweite von $F=35$ m vermessen. 80% der Spiegel erreichten eine Winkelauflösung, welche besser sind als die geforderten 1 mrad Winkelauflösung. Bei der Reflektivität erreichte nur einer von 10 Spiegeln die geforderte Bedingung von mehr als 80% gerichteter Reflektivität im Bereich von 300 nm bis 600 nm. Hier besteht also noch Verbesserungsbedarf seitens des Spiegelherstellers.

7.2 Reflektivitätsmessungen an Teleskopen

Für die Reflektivitätsmessungen an den H.E.S.S.-Teleskopen in Namibia wurden zwei Messverfahren, 2F und 20F, aufgebaut. In Heidelberg wurden beide Messaufbauten entwickelt und es wurden zahlreiche Tests durchgeführt um beide Verfahren genau zu verstehen. Mit beiden Messverfahren wurde in Namibia die Reflektivität der Teleskope in verschiedenen Wellenlängenbereichen bestimmt. Mit dem 2F-Verfahren wurden alle 4 Teleskope gemessen. Es ist, ausser bei der Messung von CT1 mit 470 nm, kein signifikanter Unterschied in der Reflektivität der Teleskope innerhalb der Fehlergrenzen zu erkennen. Mit dem 20F-Verfahren wurden CT1, CT2 und CT4 gemessen. Für die Messungen wurde nur die weisse LED benutzt. Die Reflektivität von CT1 liegt mit einem Wert von mehr als 80% über den Reflektivitäten von CT2 und CT4. Zwischen CT2 und CT4 ist kein signifikanter Unterschied in der Reflektivität zu erkennen. Die bestimmten Reflektivitäten der 2F und 20F-Messungen von CT2 und CT4 stimmen innerhalb der Messfehler

überein.

Für die Bestimmung der Reflektivität hat sich der 2F-Messaufbau als schnell, präzise und einfach zu handhaben erwiesen. In Zukunft wird damit in regelmäßigem Abständen z.B. von einem Monat, die Reflektivität bestimmt. An der LED Lampe werden dafür kleine Änderungen vorgenommen. Es wird eine UV-LED mit 400 nm eingebaut und auf der Oberseite ein Laserpointer montiert, so dass das Ausrichten der Lampe erleichtert wird. Weiterhin werden die Photodioden durch eine andere Version ersetzt, deren Sättigung erst bei einer 50fach höheren Lichtintensität einsetzt.

Mit der Fertigstellung des neuen grösseren Teleskops sollte es dann auch möglich sein, bereits zu Anfang die Reflektivität des Teleskops zu messen und dann als Funktion der Zeit zu verfolgen. Anders als die bisherigen 4 Teleskope wird es aber nicht nach dem Davis-Cotton-Design gebaut werden, sondern eine paraboloiden Form besitzen. Für dieses Teleskop wurde eine Monte-Carlo-Simulation [9] durchgeführt um zu überprüfen ob der 2F-Messaufbau verwendet werden kann. Wie sich aber zeigte, ist der Lichtfleck bei der doppelten Brennweite des Teleskops mehr als einen Faktor 2 grösser als der Verfahrenweg des Scantisches von 30 cm, s. Abb. 7.1 links. Auch wenn es nach dem Davis-Cotton-Design gebaut wäre, würde der Lichtfleck immer noch zu gross sein, s. Abb. 7.1 rechts.

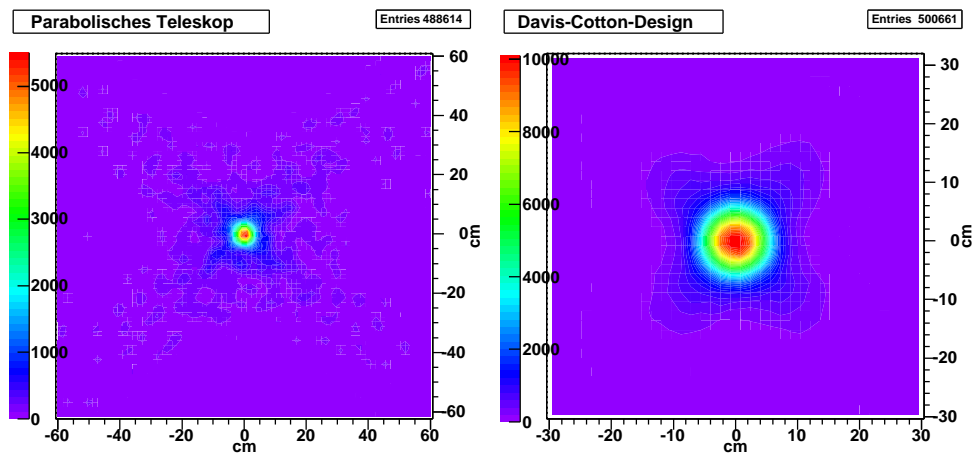


Abbildung 7.1: Monte-Carlo-Simulationen des Lichtflecks in 70 m Abstand zum Teleskop; Lichtfleck bei einer paraboloiden Teleskopstruktur. max. Ausdehnung rund 120 cm(links); Lichtfleck mit dem Davis-Cotton-Design mit einer max. Ausdehnung von rund 40 cm(rechts); die reale Ausdehnung wird aber durch die Spiegelträgerdeformation grösser sein als die Simulation.

Das neue Teleskop wird nicht mit dem bisherigen 2F-Messaufbau vermessen werden können. Die Vermessung mit der 20F-Methode mit einem Abstand von 700 m zwischen Teleskop und Lichtquelle ist möglich.

Literaturverzeichnis

- [1] F. A. Aharonian et.al. High-energy particle acceleration in the shell of a supernova remnant. *Nature* 432, 75, 2004.
- [2] Konrad Bernlöhr. *Die CRT-Projektstudie auf La Palma und ihre Ergebnisse im Hinblick auf die Zusammensetzung der ultrahochenergetischen kosmischen Teilchenstrahlung*. Habilitationsschrift, Universität Heidelberg, 1995.
- [3] Sami Elfahem. *Evaluierung von Spiegeln für die HESS-Čerenkov-Teleskope*. Diplomarbeit, Universität Heidelberg, 2001.
- [4] LUMILEDS. *Datenblatt für LED der LUXEON Baureihe*.
- [5] Dario Giuseppe Motta. *Feasibility Analysis and Prototype Measurements of a Novel Approach for the Real-Time Spectroscopy of Low Energy Solar Neutrinos*. Dissertation, Universität Heidelberg, 2004.
- [6] John Harrison. *Investigation of Reflective Materials for the Solar Cooker*, 2001.
- [7] SCHOTT AG. *Interference Filters and Special Filters*, 2005.
- [8] LINOS PHOTONICS. *Produktkatalog*, 2004.
- [9] K. Bernlöhr. *Monte-Carlo-Simulationen mit dem Raytracing Programm für die H.E.S.S. Optik*, 2004.
- [10] R.N.Wilson. *Reflecting Telescope Optics 1*. Springer-Verlag, zweite edition, 1996.
- [11] R.N.Wilson. *Reflecting Telescope Optics 2*. Springer-Verlag, erste edition, 1999.
- [12] M.S.Longair. *High energy astrophysics, Volume 1*. Cambridge University Press, zweite edition, 1992.
- [13] SRS Stanford Research Systems. *Betriebsanleitung für den DSP Lock-In Amplifier SR830*.

-
- [14] K. Bernlöhr et.al. *The optical system of the H.E.S.S. imaging atmospheric Cherenkov telescopes, Part 1: layout and components of the system*, 2003.
- [15] G. Hermann. *Persönliche Mitteilungen*, 2004.
- [16] W. Hofmann. *Persönliche Mitteilungen*, 2004.

Danksagung

Allen voran möchte ich Herrn Professor Dr. Werner Hofmann danken, diese Arbeit in seiner Arbeitsgruppe durchzuführen zu können und die Möglichkeit erhalten habe direkt in Namibia den Messaufbau aufzubauen. Weiterhin danke ich Dr. German Herman für die vielen Gesprächen, die viele Dinge klarer erschienen ließen und neue Ideen für die Messaufbauten hervorbrachten.

Danke an Christian Föhr, Thomas Schwab und Thomas Wagener für die Unterstützung in allen elektronischen Fragen, die erst die Messungen in Namibia ermöglichten.

Danke an die Mechanikabteilung mit Hans Fuchs, Stefan Schmidt, Frank Garrecht, Christian Neureuter und Peter Gaa, die Teile der Messaufbauten herstellten und dies schnell und präzise. Vielen Dank an Jörg Baumgart, der mir beim Messaufbau und den Messungen hilfreich zur Hand ging und manche Messungen überhaupt erst ermöglichte.

Sehr viel Dank gebührt Dominik Hauser, Svenja Klages, Rolf Bühler, Kathrin Egberts, Jim Hinton und Isabell Braun sowie allen Mitgliedern der H.E.S.S.-Gruppe für die wohl beste Arbeitsatmosphäre und lustige Stunden.

Dank an David Berge und Oliver Bolz für die Unterstützung bei den Messungen in Namibia. Ebenso an die Crew vor Ort in Namibia die mich immer voll unterstützt hat und mit deren Hilfe viele Probleme gelöst werden konnten.

Ich möchte mich bei meinen Physiklehrern Frau Dr. Walther und Herrn Rafelt bedanken, die mein Interesse an der Physik erkannten und mir bei Fragen immer hilfreich zur Seite standen.

Besonderer Dank gilt meinen Eltern und meiner Schwester die mich in jeder Hinsicht unterstützt haben und immer volles Vertrauen in mich und meine Entscheidungen hatten.

Erklärung:

Ich versichere, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Heidelberg, den _____

Unterschrift