

Flächenmessung der LYRA-Blenden

Christian Walther <cwalther@gmx.ch>, PMOD/WRC

April–Juni 2005

Mit einem neuen Verfahren an der bestehenden Blendenmessanlage am PMOD konnten die Flächenverhältnisse der 3-mm-Präzisionsblenden für das LYRA-Experiment auf unter 10^{-3} genau bestimmt werden. Einige experimentelle Schwierigkeiten mussten hierzu überwunden werden. Für die Durchführung und Auswertung der Messungen wurden Programme in LabVIEW und Matlab von Grund auf neu entwickelt.

Inhaltsverzeichnis

1	Messanordnung	2
1.1	Bestandteile	2
1.2	Aufbau	3
2	Theorie und Begründung des Verfahrens	3
3	Vorbereitungen, erste Messungen, Probleme und deren Überwindung	9
3.1	Zeitlicher Verlauf der Lampenleistung	9
3.2	Entscheidung zwischen linearem und 2D-Scan	10
3.3	Schwierigkeiten	11
4	Ablauf der definitiven Messung	15
4.1	Plan	15
4.2	Messprogramm	16
4.3	Start der Messung	18
5	Diskussion der Messdaten und Ablauf der Auswertung	18
5.1	Grobablauf	18
5.2	Auswertung eines 2D-Scans	18
5.3	Merkmale von Beispieldaten	19
5.4	Ausgabe der Endauswertung	22
6	Resultate	24
	Literatur	26

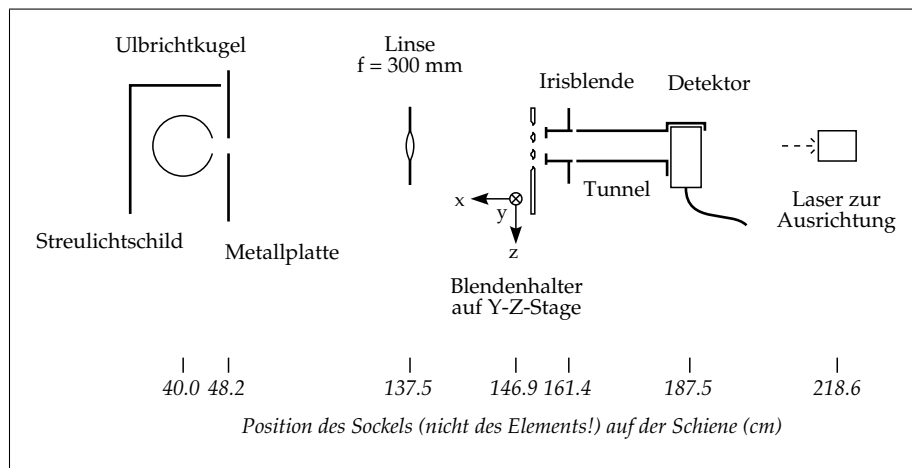


Abbildung 1: Messanordnung – Seitenansicht, nicht massstäblich

1 Messanordnung

1.1 Bestandteile

Die Messanordnung ist schematisch aufgezeichnet in **Abbildung 1** und besteht aus folgenden Elementen:

- Ulbrichtkugel mit zwei Halogenlampen (12 V, 50 W), parallel an Netzgerät angeschlossen.
- Metallplatte mit Öffnung, um direktes Licht der Lampen von der Anordnung fernzuhalten.
- Streulichtschild aus Kartonschachtel. Auch wenn keine eindeutig auf das Streulicht zurückzuführenden Probleme festgestellt wurden, reduzierte der Schild das Hintergrundniveau der Messungen doch um ca. einen Faktor 3. Entgegen ursprünglichen Befürchtungen erwiesen sich die Lüftungslöcher als ausreichend, um die Temperatur des Kartons auch im Dauerbetrieb auf ungefährlichem Niveau zu halten.
- Linse mit 300 mm Brennweite, die die Öffnung der Ulbrichtkugel auf den Detektor abbildet.
- Auszumessende Blenden in Halter. Mittels der Y-Z-Stage, deren Schrittmotoren über die parallele Schnittstelle des Computers gesteuert werden, kann jede der 9 Blenden in den Lichtstrahl gefahren werden.
- Irisblende, die den Lichteinfall auf eine einzige Blende beschränkt.
- Tunnel aus filzbeschichtetem schwarzem Karton, um Streulicht vom Detektor fernzuhalten.
- Detektor mit Treiberelektronik und Solartron 7150 Multimeter, das über GPIB (Adresse 10) an den Computer angeschlossen ist.

- Laserpointer für die Ausrichtung beim Aufbau.

Alle Teile sind auch in den folgenden Photos zu sehen, die in höherer Qualität auch im Ordner *Photos* abgelegt sind: Abbildungen 2, 3, 4, 5.

1.2 Aufbau

- Den Laser so einstellen, dass sein Strahl möglichst parallel zur Schiene verläuft und innerhalb des Aktionsbereichs der Y-Z-Stage von jeder Blende erreichbar ist. Ulbrichtkugel so positionieren, dass der Strahl möglichst senkrecht genau in die Mitte der Öffnung fällt. Streulichtschild aufsetzen.
- Eine Öffnung des Blendenhalters in den Laserstrahl fahren und mit Blick durch diese Öffnung und auf schwache Helligkeit eingestellter Lampe die Metallplatte so positionieren, dass durch die Öffnung der Platte die gesamte Öffnung der Ulbrichtkugel sichtbar ist.
- Ungefähre Position von Linse und Detektor so festlegen, dass ein scharfes Bild der Lichtquelle auf dem Detektor entsteht, das in der Grösse auf die Detektorfläche passt und einen Grossteil davon ausfüllt. Die in Abbildung 3 sichtbare Blende vor der Linse deckt den Rand der Linse ab, dessen Unregelmässigkeiten (insbesondere ein abgesplittertes Stück) zu unerwünschten Lichtflecken im Strahl führen.
- Detektor entfernen und Position und Ausrichtung der Linse so justieren, dass der transmittierte Laserstrahl an denselben Ort in der Ulbrichtkugel und die beiden an Vorder- und Rückseite der Linse reflektierten Strahlen in den Laser zurück fallen.
- Y-Z-Stage mit Blendenhalter möglichst nahe an der Linse montieren.
- Irisblende möglichst nahe an den Blendenhalter schieben und im Laserstrahl zentrieren.
- Bei geöffneter Irisblende und entferntem Blendenhalter den Detektor im scharfen Bild der Lichtquelle positionieren. Tunnel aufsetzen.

2 Theorie und Begründung des Verfahrens

Beim bisherigen Messverfahren, das von Lars Konersmann [1] beschrieben wird, wurde jeweils eine Blende ins Zentrum des Lichtstrahles gefahren und dann (über mehrere Ablesungen gemittelt) die hindurchtretende Lichtleistung gemessen, dies abwechselungsweise für einen Prüfling und eine Referenzblende mit bekannter Fläche. Bei der Auswertung wurde dann angenommen, dass die Fläche der Blende proportional zu dieser Lichtleistung sei. Diese Methode geht von zwei Annahmen aus: Dass die Beleuchtung im Bereich der Blende homogen sei, und dass die Position der Blendenöffnung relativ zum Strahlzentrum genügend genau bekannt sei. Wie schon in Ref. [1] festgestellt, sind diese Annahmen in Wirklichkeit nicht besonders gut erfüllt, was durch Mitteln über viele Messungen kompensiert werden muss. Deshalb wird hier ein Messverfahren vorgeschlagen, das auf keine der beiden Annahmen angewiesen ist.

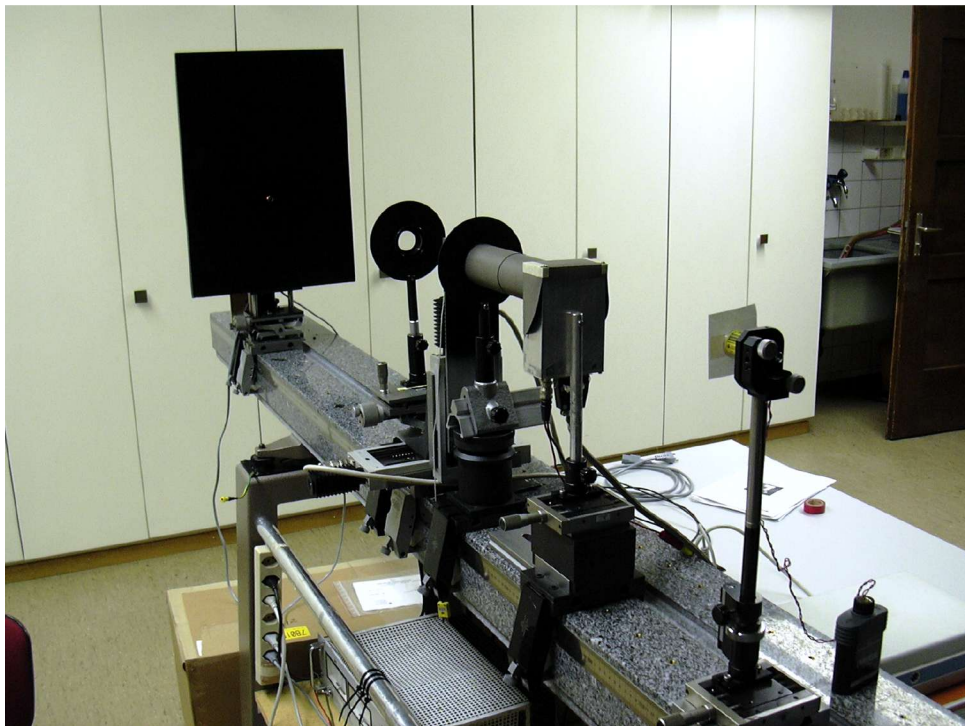
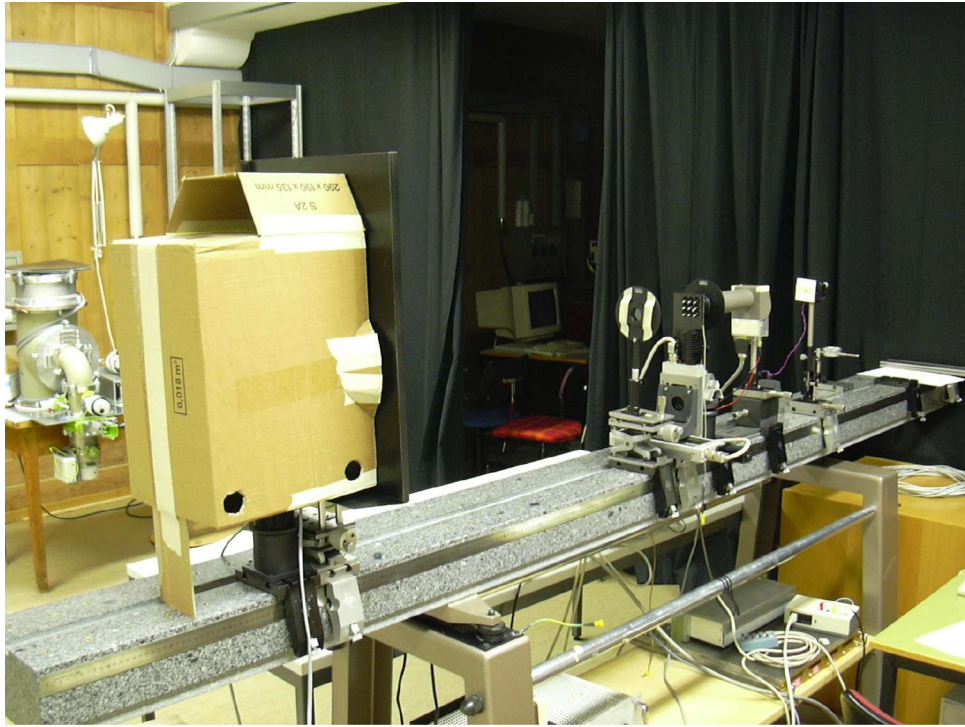


Abbildung 2: Messanordnung (*Setup1.jpeg*, *Setup2.jpeg*)

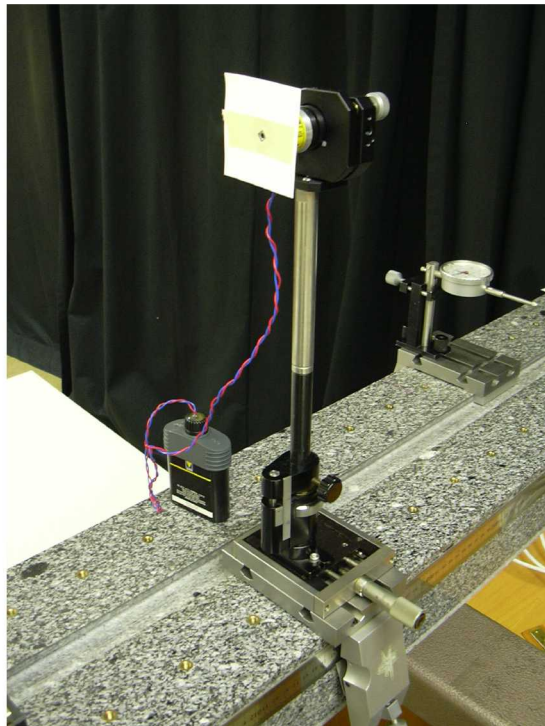
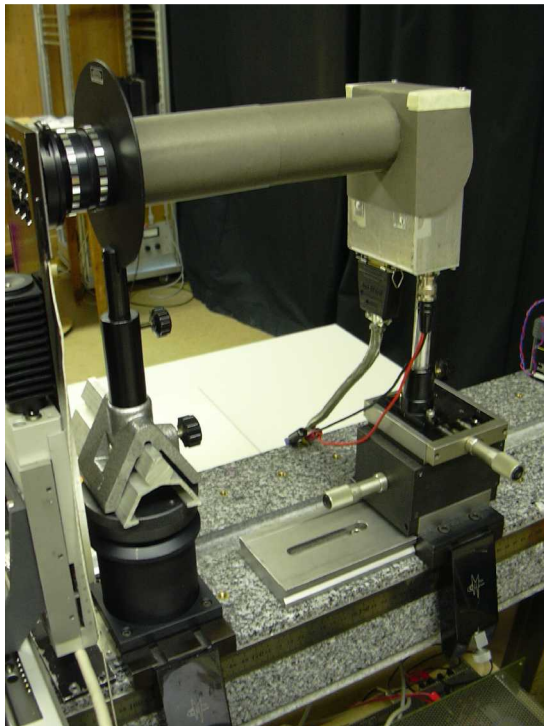
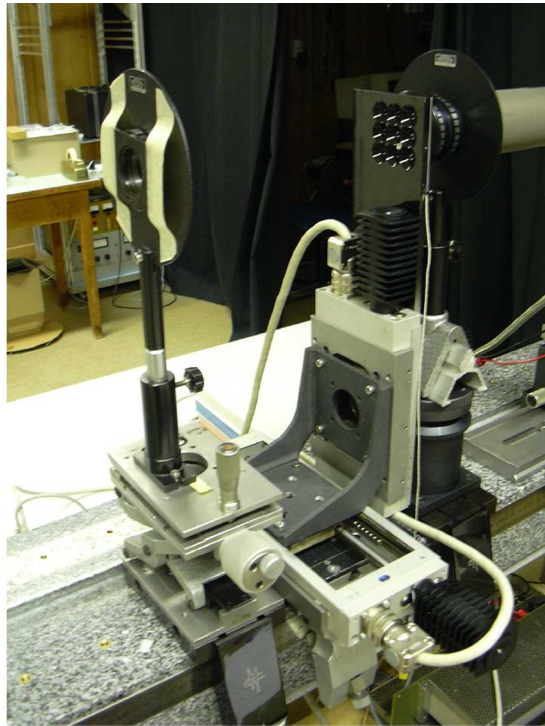


Abbildung 3: Ulbrichtkugel mit Metallplatte (*Ulbricht.jpeg*); Linse und Blendenhalter (*Linse.jpeg*); Irisblende, Tunnel und Detektor (*Tunnel.jpeg*); Laserdiode (*Laser.jpeg*)

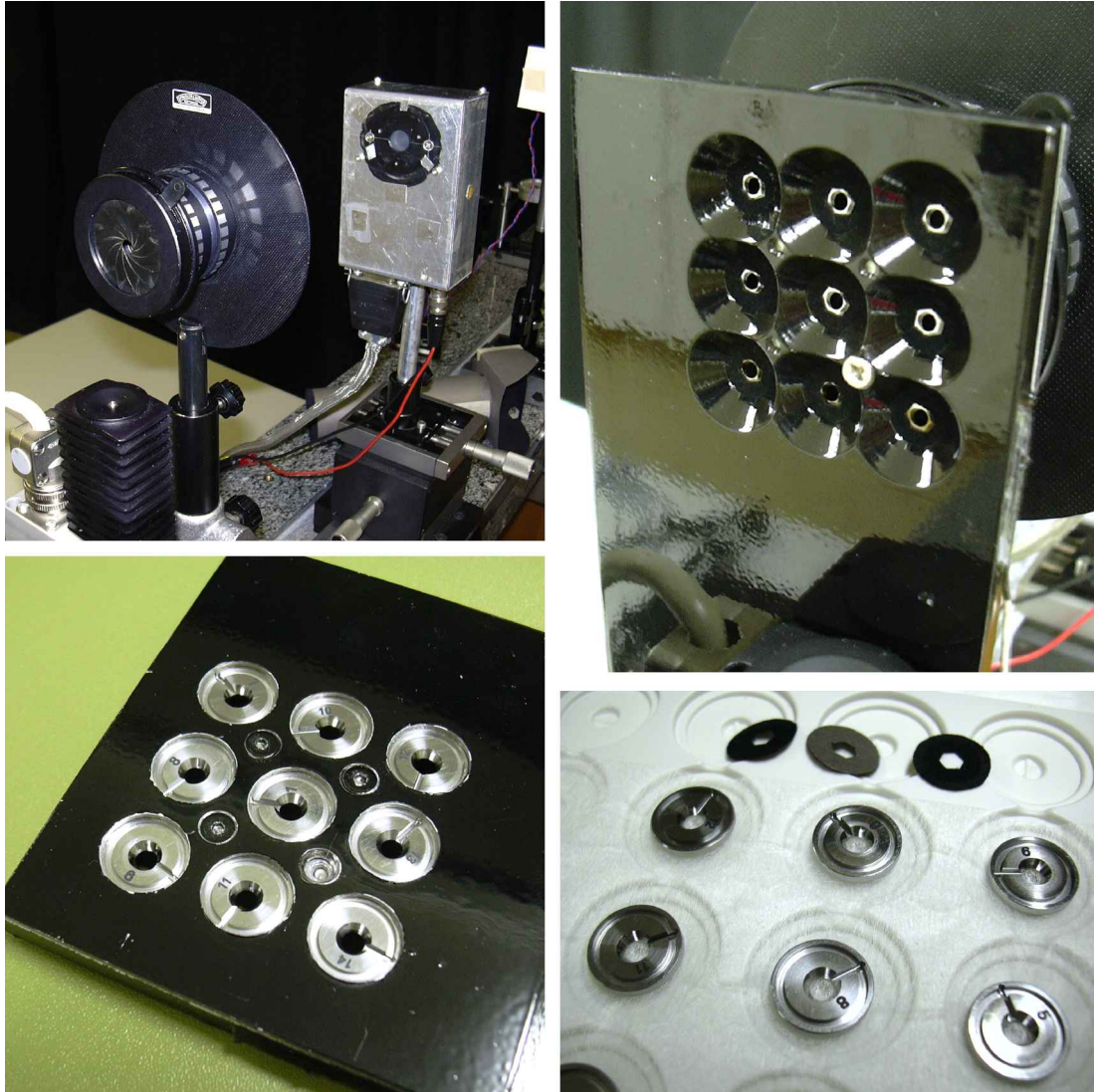


Abbildung 4: Irisblende und Detektor bei entferntem Blendenhalter und Tunnel (*Iris.jpeg*); Blendenhalter mit Masken (*Masken.jpeg*); LYRA-Blenden im Halter (*Blendenhalter.jpeg*); LYRA-Blenden und drei der Masken (*Blenden.jpeg*)

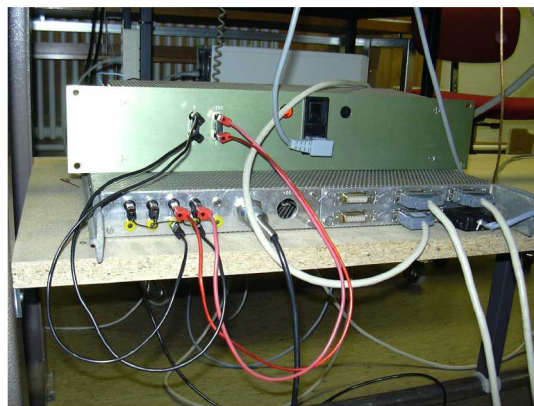


Abbildung 5: Netzgerät für die Ulbrichtkugel (*Netzgeraet.jpeg*); Schrittmotoren-Controller mit 15-V-Netzgerät für die Elektronik und 28-V-Netzgerät für die Motoren (*Controller1.jpeg*, *Controller2.jpeg*); Detektortreiber und Multimeter (*Multimeter1.jpeg*, *Multimeter2.jpeg*)

Wenn die Irisblende, die den vom Detektor betrachteten Bereich auf eine einzige Öffnung des Blendenhalters einschränkt, genügend nahe beim Prüfling liegt, können die beiden als am selben Ort sitzend betrachtet werden und es spielt dann keine Rolle, welche der beiden Blenden zuerst kommt. Für die folgende Erklärung ist es einfacher anzunehmen, die strahlbeschränkende Irisblende liege vor der zu messenden Blende im Lichtstrahl, auch wenn die Situation in Wirklichkeit umgekehrt ist.

Die in der Ebene des Prüflings herrschende Intensitätsverteilung $I(x)$ (mit einer Koordinate $x = (y, z) \in \mathbb{R}^2$ relativ zum Zentrum des Prüflings) ist dann das Produkt aus der direkt vor der Irisblende herrschenden Intensitätsverteilung und der charakteristischen Funktion der Irisblendenfläche. Die Intensitätsverteilung direkt nach dem Prüfling ist $I(x) \cdot \chi_D(x)$, wo $D \subset \mathbb{R}^2$ die Blendenfläche des Prüflings und χ_D deren charakteristische Funktion ist. Die gesamte hindurchtretende Leistung ist dann das Integral davon:

$$P = \int_{\mathbb{R}^2} I(x)\chi_D(x)dx = \int_D I(x)dx.$$

Da alles Licht auf den Detektor abgebildet wird, ist dies auch die am Detektor gemessene Leistung. Wird der Strahl um $\mathbf{y} = (\Delta y, \Delta z)$ verschoben, so ist die gemessene Leistung

$$P(\mathbf{y}) = \int_{\mathbb{R}^2} I(x - \mathbf{y})\chi_D(x)dx = \int_D I(x - \mathbf{y})dx = (I^- * \chi_D)(\mathbf{y})$$

die Faltung des gespiegelten einfallenden Intensitätsprofils $I^-(x) = I(-x)$ und der Blendenfläche. Wird diese Grösse über alle möglichen Strahlpositionen \mathbf{y} integriert, so erhält man

$$M = \int_{\mathbb{R}^2} P(\mathbf{y})d\mathbf{y} = \int_{\mathbb{R}^2} \int_D I(x - \mathbf{y})dxd\mathbf{y} \underset{\substack{\mathbf{y}' = x - \mathbf{y} \\ \mathbf{y} = x - \mathbf{y}' \\ d\mathbf{y} = d\mathbf{y}'}}{=} \int_{\mathbb{R}^2} \int_D I(\mathbf{y}')dxd\mathbf{y}' = \underbrace{\int_D dx}_A \underbrace{\int_{\mathbb{R}^2} I(\mathbf{y}')d\mathbf{y}'}_{\text{unabhängig von } D},$$

eine Grösse, die proportional zum Flächeninhalt A der Blende D ist. Dies gilt auch dann, wenn das Strahlprofil $I(x)$ an unbekannter Stelle zentriert und an keinem Ort homogen ist. Da der Detektor nicht absolut geeicht ist, sondern eine elektrische Spannung von sich gibt, kommt in der Praxis noch eine weitere Proportionalitätskonstante hinzu.

Die nächste Frage ist also, wie in der Praxis das Integral M auf möglichst effiziente Weise zu bestimmen ist. Effizient heisst hier vor allem, mit möglichst grossem Anteil aktiver Integrationszeit des Multimeters an der gesamten Dauer der Messung und entsprechend möglichst wenig langsamem Herumfahren der Y-Z-Stage. Wenig zurückgelegter Weg bedeutet wegen der verlorenen Schritte der Schrittmotoren und vor allem deren Richtungsabhängigkeit («Differenz der Steigungen») [2] auch grössere Genauigkeit der Positionierung.

Natürlich ist $P(\mathbf{y}) = 0$ sobald $\|\mathbf{y}\|$ genügend gross ist, es muss also nur über ein endliches Gebiet integriert werden. Die naheliegendste Möglichkeit ist, $P(\mathbf{y})$ in einem Quadrat auf einem quadratischen Raster zu messen, das zeilenweise auf einer Schlangenlinie (eine Zeile vorwärts, die nächste rückwärts) abgefahren wird. Um die Anzahl Messpunkte, den zurückgelegten Weg und damit die Messdauer in akzeptablen Grenzen zu halten, kann dieses Gitter allerdings nicht sehr fein sein.

Wenn man annimmt, dass die Funktion $P(\mathbf{y})$ rotationssymmetrisch ist (was der Fall ist, wenn die Beleuchtung homogen sowie Irisblende und Prüfling perfekt kreisförmig sind), gibt es eine weitere Möglichkeit: dann ist die gesamte Funktion, also auch ihr Integral, bestimmt durch ihre Werte auf einem radialen Durchlauf. Sieht man von einer homogenen Beleuchtung ab und lässt zu, dass $P(\mathbf{y})$ aus einem rotationssymmetrischen und einem antisymmetrischen Anteil besteht,

$$P(\mathbf{y}) = P_r(\|\mathbf{y}\|) + P_a(\mathbf{y}) \quad (P_a(\mathbf{y}) = -P_a(-\mathbf{y})),$$

was nach Ref. [1] z.B. mit einem im Zentrum linearen und aussen verschwindenden P_a näher an der Realität liegt, so bleibt das Integral bestimmbar:

$$M = \int_{\mathbb{R}^2} P(\mathbf{y}) d\mathbf{y} = \int_{\mathbb{R}^2} P_r(\|\mathbf{y}\|) d\mathbf{y} + \underbrace{\int_{\mathbb{R}^2} P_a(\mathbf{y}) d\mathbf{y}}_{=0} = 2\pi \int_0^\infty P_r(r) r dr,$$

und P_r kann bestimmt werden aus den Messwerten $P(y, 0)$ aus einem linearen Scan durchs Zentrum:

$$\begin{aligned} P(y, 0) + P(-y, 0) &= P_r(|y|) + P_a(y, 0) + P_r(|-y|) + P_a(-y, 0) \\ &= P_r(|y|) + P_a(y, 0) + P_r(|y|) - P_a(y, 0) \\ &= 2P_r(|y|). \end{aligned}$$

Diese Methode bedingt, dass das Symmetriezentrum von $P(\mathbf{y})$, hier als Koordinatenursprung $\mathbf{y} = (0, 0)$ festgelegt, bekannt ist. Dieses kann jedoch aus zwei senkrechten früheren Scans bestimmt werden. Da auf dem linearen Scan viel weniger Weg zurückgelegt wird als auf dem Schlangenlinien-Scan, können hier die Messpunkte viel dichter gelegt werden, und es können in derselben Zeit mehr Messpunkte genommen werden. Diese Verbesserung wird allerdings erkaufte durch die zusätzliche Annahme an die Form von $P(\mathbf{y})$. In der Tat zeigte die Auswertung des experimentellen Vergleichs der beiden Methoden, siehe Abschnitt 3.2, dass dies ein schlechtes Geschäft ist.

3 Vorbereitungen, erste Messungen, Probleme und deren Überwindung

3.1 Zeitlicher Verlauf der Lampenleistung

Ref. [1] sagt, dass die Intensität der Lichtquelle nach 3 Stunden hinreichend konstant sei, um mit den Blendenmessungen zu beginnen. Die zur Begründung dieser Aussage angegebenen Messdaten scheinen sich allerdings nur über einige Minuten zu erstrecken und sind von entsprechend geringem Nutzen. Es wurde deshalb mit Hilfe des LabVIEW-Programmes *Solartron Log.vi* eine neue Messung über mehrere Stunden durchgeführt. Das Resultat zeigt Abbildung 6. Offensichtlich geht die Kurve ungefähr eine halbe Stunde nach dem Einschalten über zu einem ungefähr exponentiell konvergierenden Anstieg, dessen Parameter durch einen Least-Squares-Fit bestimmt wurden. Die Leistung steigt anfangs mit einer Rate von $1.2 \cdot 10^{-3}$ pro Stunde, und diese Rate halbiert sich alle 3.7h. Um die exponentielle Kurve herum schwankt die Leistung um ca. $1.6 \cdot 10^{-4}$ (Standardabweichung).

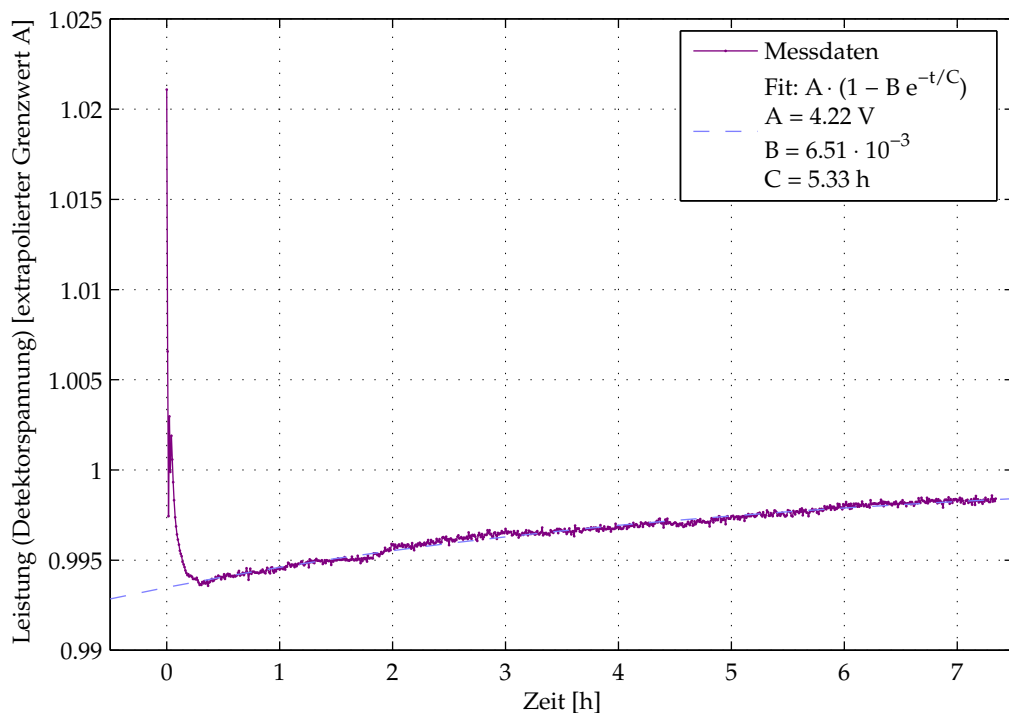


Abbildung 6: Zeitlicher Verlauf der Lampenleistung

Die Aussage, dass die Konstanz nach 3 Stunden genügend oder wesentlich besser als vorher sei, scheint also etwas fragwürdig. Hingegen lässt sich sagen, dass ab einer halben Stunde lineare Interpolation auf Stücken kürzer als 3 Stunden problemlos möglich ist (für längere Stücke übersteigt der maximale Interpolationsfehler die Schwankung $1.6 \cdot 10^{-4}$).

3.2 Entscheidung zwischen linearem und 2D-Scan

Um linearen und zweidimensionalen Schlangenlinien-Scan zu vergleichen, wurden im LabVIEW-Programm *Aperture.vi* (dessen finale Version in Abschnitt 4.2 im Detail beschrieben wird) die folgenden Strategien dafür implementiert. Für beide wird die Referenzblende mit bekannter Fläche in der zentralen Öffnung des Blendenhalters montiert und in den umliegenden 8 Öffnungen N Prüflinge.

Linearer Scan

Die Öffnungen des Blendenhalters liegen ungefähr auf einem quadratischen Gitter mit 15 mm Maschenweite. Diese Werte werden als Startwerte für die Abschätzung der Blendenpositionen genommen. Zuerst werden $2N + 1$ horizontale Scans durch das vertikale Zentrum aller Blenden gemacht, in der Reihenfolge Referenzblende-1. Prüfling-Referenz-2. Prüfling-Referenz-...-Letzer Prüfling-Referenz. Ein Scan geht von -6 mm bis 6 mm, und alle $30 \mu\text{m}$ wird ein Messpunkt genommen (also 401 Messpunkte pro Scan). Aus den horizontalen Scans werden dann die horizontalen Zentrumskoordi-

naten genauer bestimmt. Es folgt ein Durchlauf mit $2N + 1$ vertikalen Scans in derselben Reihenfolge, aus denen die vertikalen Zentrumskoordinaten bestimmt werden, und wieder ein Durchlauf horizontaler Scans, und so weiter für eine beliebige Anzahl Durchläufe. Die Messdaten aus dem ersten horizontalen Durchlauf werden für die Auswertung nicht berücksichtigt, da diese Scans nicht genau durch die Zentren gehen, alle weiteren Durchläufe können ausgewertet werden.

Die Bestimmung des Zentrums aus dem Array von äquidistanten Samples wird vom LabVIEW-Sub-VI *CW FindCenter.vi* und von der Matlab-Funktion *findCenter.m* in einer Weise durchgeführt, die im Gegensatz zu einer simplen Schwerpunktsberechnung auch dann zuverlässig funktioniert, wenn der gesampelte Bereich nur einen (nicht zentrierten) Teil des Trägers der Funktion überdeckt. Details werden in der internen Dokumentation dieser beiden Dateien erklärt.

2D-Scan

Ein Durchlauf besteht aus $2N + 1$ Scans über alle Blenden in derselben Reihenfolge wie beim linearen Scan. Ein Scan geht über ein Quadrat von 12 mm Seitenlänge, zentriert an der aktuellen Schätzung der Zentrumsposition. Messwerte werden auf einem quadratischen Gitter mit 0.5 mm Maschenweite genommen, das auf einer Schlangenlinie zeilenweise durchlaufen wird (625 Messpunkte pro Scan). Die Zeilen verlaufen in Z-Richtung, und von einer Zeile zur nächsten gesprungen wird in negativer Y-Richtung. Diese Richtungswahl sollte nach den früher gemessenen Daten über die Genauigkeit der Stage [2] zu den geringsten Positionsabweichungen führen. Nach dem Scan wird der Schwerpunkt der gemessenen Werte berechnet und als neue Zentrumsposition verwendet.

Auswertung

Den Berechnungen in Abschnitt 2 folgend wurde aus einer Reihe von Messungen an einer einzelnen Prototyp-Blende, abwechselnd ein 2D-Scan und einige lineare Scans, die Integrale M berechnet (Details des Auswertungsverfahrens werden in Abschnitt 5 beschrieben). Das Resultat ist in Abbildung 7 zu sehen. Jeder farbige Balken entspricht einem Scan, wobei die Breite des Balkens die Dauer angibt. 2D-Scans dauern ca. 22 min, lineare Scans ca. 4 min. Für jede Gruppe von aufeinanderfolgenden linearen Scans wurde ausserdem der Mittelwert der Integrale gebildet, er ist als schwarz punktierter Balken eingezeichnet. Neben einem generellen leichten Anstieg mit der Zeit, der auf die wachsende Lampenleistung zurückzuführen ist, ist ersichtlich, dass die Integrale aus den linearen Scans stärker streuen als diejenigen aus den 2D-Scans, selbst wenn man so viele lineare Scans zusammenmittelt, dass ungefähr die gleiche Messzeit wie bei einem 2D-Scan resultiert. Ausserdem liegen unter den linearen Scans die Integrale der horizontalen konsistent deutlich über denjenigen der vertikalen Scans. Beides deutet darauf hin, dass die Annahme an die Symmetrie der Messdaten, die für die linearen Scans gemacht wird, nicht in genügendem Masse erfüllt ist. Es wurde deshalb die Entscheidung getroffen, für die folgenden Messungen nur noch 2D-Scans zu verwenden.

3.3 Schwierigkeiten

Bei den folgenden Testmessungen traten einige Hindernisse zutage, die mit speziellen Massnahmen überwunden werden mussten.

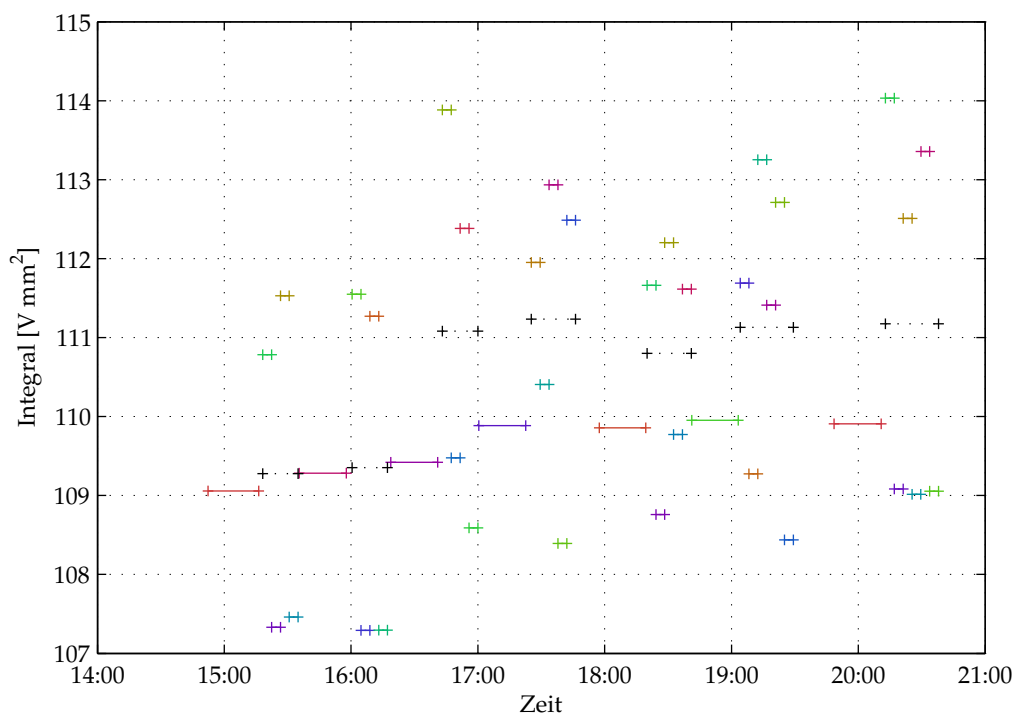


Abbildung 7: Vergleich von linearen und 2D-Scans

Spontane Resets des Multimeters

Das verwendete Multimeter Solartron 7150 hatte die Angewohnheit, sich hin und wieder zu unvorhersehbaren Zeitpunkten so zu verhalten, als ob es gerade aus- und wieder eingeschaltet worden wäre: Es schaltet irgendein internes Relais um (als Klickgeräusch hörbar), führt seine Selbsttests durch und geht in den werkseingestellten Grundzustand über. Das bedeutet, dass die gerade aktive Messung fehlschlägt, weil das Multimeter dafür in einem bestimmten Zustand sein muss (Details in der Dokumentation von *Solartron7150Init.vi* und *Solartron7150Measure.vi*). Die Ursache dieses Verhaltens konnte nicht festgestellt werden. Der erste Verdacht eines Wackelkontaktes beim Netzstecker stellte sich als unzutreffend heraus. Die spontanen Resets scheinen ausserdem nur während laufenden Messungen aufzutreten, also wenn sich das Multimeter in dem erwähnten Einzelmessungs-Modus befindet, aber nicht im kontinuierlich messenden Grundzustand.

Zur Handhabung dieses Problems wurde das entsprechende LabVIEW-Sub-VI *Solartron7150Measure.vi* folgendermassen erweitert: Wenn bis 10 Sekunden nach einer Messaufforderung keine Antwort vom Multimeter zurückkommt, wird angenommen, es sei zurückgesetzt worden, und es wird mittels *Solartron7150Init.vi* wieder in den erforderlichen Zustand gesetzt. Dann wird die Messung erneut versucht. Ausserdem werden Datum und Zeit dieses Ereignisses in der Datei *solartron-reset-log.txt* in der Document Root des LabVIEW-Webservers aufgezeichnet. Die Auswertung einer solchen Protokolldatei zeigt Abbildung 8. Offensichtlich treten oft Häufungen von Resets innerhalb weniger Minuten auf, dann aber auch wieder stundenlang keine. Sie scheinen

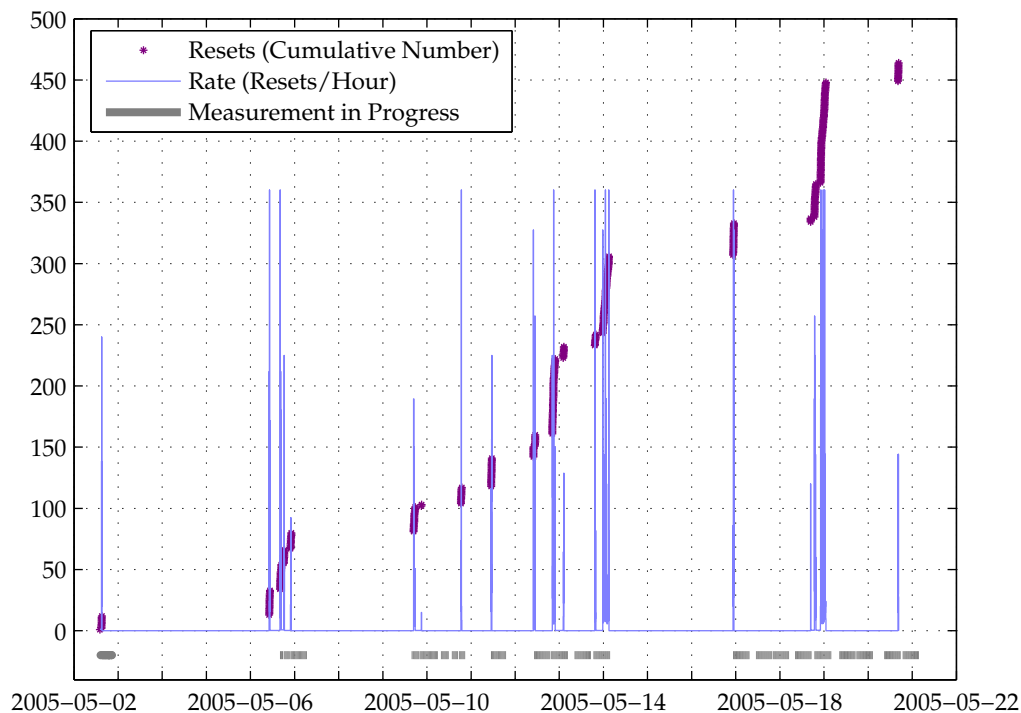


Abbildung 8: Spontane Resets des Multimeters

ausserdem bevorzugt, aber nicht ausschliesslich, zu Beginn der Messungen aufzutreten. Häufig erreicht die Rate 360 Ereignisse pro Stunde, das bedeutet, dass unmittelbar nachdem ein Reset durch Zurückstellen in den Messzustand behoben wurde ein neuer Reset auftritt, der nach den 10 Sekunden Timeout bemerkt und erneut behoben wird.

Verschlechterung der Genauigkeit der Z-Stage

Während der Testmessungen wurde beobachtet, dass sich die Genauigkeit der Z-Stage (vertikal), insbesondere die Differenz im Anteil verlorener Pulse zwischen positiver und negativer Laufrichtung, ständig verschlechterte. Bei einer Differenz in der Gröszenordnung von 10^{-4} , wie sie für 6 ms Schrittastand früher gemessen wurde [2], würde bei einem 2D-Scan, wo 25 Zeilen von 12 mm Länge abwechselnd in positiver und negativer Richtung durchlaufen werden, eine Abweichung von ca. 0.02 mm erwartet. Abweichungen kleiner als 0.1 mm sind bei einer Schrittweite von 0.5 mm kein Problem, Verschiebungen der Zeilen gegeneinander wirken sich auf das Integral nicht aus, und die unterschiedliche Dehnung oder Stauchung von geraden und ungeraden Zeilen, sofern sie konstant ist, mittelt sich heraus zu einem zusätzlichen konstanten Proportionalitätsfaktor. Was jedoch beobachtet wurde, sind stark schwankende Abweichungen von bis zu 1.2 mm pro Scan. Das Hauptproblem hierbei ist, dass sich die Abweichung über viele Scans kumuliert. Dies spielt keine Rolle für die Referenzblende, die alle zwei Scans gescannt wird und deren Zentrumspositions-Schätzung deshalb ständig nachgeführt wird, aber bei den letzten Prüflingen, wo immer noch die ursprüngliche Schätzung auf dem 15-mm-Gitter gilt, kann sich die tatsächliche Position über alle vor-

herigen Scans so weit davon entfernt haben, dass ein signifikanter Anteil der Funktion abgeschnitten wird, was die Berechnung des Integrals verunmöglicht.

Die Ursache dieser Verschlechterung ist unbekannt. Zerlegen der Stage führte zur Einschätzung, dass entgegen der Befürchtung alle Teile noch recht gut beweglich waren und Reinigen und neues Schmieren wohl keine grosse Verbesserung gebracht hätten. Die Federn, deren Kraft die Bewegung in positiver Richtung antreibt und bei Bewegung in negativer Richtung vom Motor überwunden werden muss, sind zwar recht stark, doch es gibt keinen Grund zur Annahme, dass die Federn stärker oder der Motor schwächer geworden wären.

Ein Teil der verlorenen Pulse scheint ausserdem vom Controller selbst verursacht zu werden. Das System, dass die Pulse nicht im Controller erzeugt werden, sondern jeder einzelne Puls vom Computer an den Controller übertragen werden muss, macht die Sache sehr fehleranfällig. Ressourcenintensive Prozesse auf dem Computer, z.B. der Virens scanner, der zu bestimmten Zeiten automatisch gestartet wird, können das Timing der Pulse so durcheinanderbringen, dass signifikant mehr Pulse verlorengehen als im ungestörten Betrieb.

Dieses Problem wurde durch zwei Massnahmen behandelt: Zum einen wurde der Zeitabstand der Pulse schrittweise von 6 ms auf 9 ms erhöht. Dies verringerte die Abweichung auf maximal ca. 0.1 mm pro Scan, für die meisten Scans deutlich weniger. Allerdings erhöhte es die Dauer eines Scans auf ca. 31 min und damit die eines Durchlaufs über einen voll gefüllten Blendenhalter (17 Scans) auf ca. 9 h. Zum anderen wurde eine automatische Rekalibration ins Messprogramm eingeführt: Nach jedem Scan über die zentrale Referenzblende wird deren Zentrumsposition (Schwerpunkt der Messwerte) neu als Koordinatenursprung festgelegt. Damit wird vermieden, dass sich die Abweichungen über mehr als zwei Scans kumulieren können. Der Betrag dieser Korrekturen wird für Diagnosezwecke aufgezeichnet.

Reflexion an der Blendenrückseite

Die der Lichtquelle zugewandte Seite der Blenden ist bis auf die Öffnung eine ebene blanke Metallfläche und hat, insbesondere direkt nach der Reinigung, eine recht hohe spekulare Reflektivität. Ein Teil des von der Blende reflektierten Lichts kann nach einer weiteren Reflexion an der unbeschichteten Oberfläche der Linse auch noch auf den Detektor gelangen. Dies hat tatsächlich einen merklichen Einfluss auf die Messdaten, der vor allem an einem Merkmal auffällt: Im Gegensatz zur schon etwas korrodierten Prototyp-Blende war das zentrale Plateau der Messdaten bei einer blanken Blende nicht eben oder leicht konkav (siehe Abschnitt 5.3), sondern deutlich konvex.

Diese Krümmung, und damit wohl auch eventuelle andere Einflüsse der Reflexion, verschwindet, wenn der grösste Teil der reflektierten Blendenfläche abgedeckt wird mit einer Maske aus schwarzem Filzpapier, wie in Abbildung 4 sichtbar. Die Löcher der Masken sind hexagonal statt kreisförmig, weil bei dieser Form beim Ausschneiden mit dem Messer einfacher ein sauberer, fusselreier Rand erreicht werden kann.

4 Ablauf der definitiven Messung

4.1 Plan

Nachdem die Anordnung wie im letzten Abschnitt beschrieben einen mehr oder weniger zuverlässig funktionierenden Zustand erreicht hatte, konnte die eigentliche Messung der LYRA-Blenden beginnen. Es handelt sich um 14 Blenden, nummeriert von 1 bis 14. Blende Nr. 1 wurde durch Metas mechanisch ausgemessen und dient als Referenzblende, die im Zentrum des Blendenhalters platziert wird. Die übrigen 13 Blenden werden abwechslungsweise in den 8 übrigen Plätzen montiert, und zwar so, dass jede Blende genau einmal an jedem Platz gemessen wird. Dies macht 13 Messdurchläufe nötig. Abbildung 9 illustriert den Plan der Messungen: Das Feld in Zeile i und Spalte j gibt an, an welchem Platz Blende i im Durchlauf j sitzt.

		Durchlauf												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Blende	1	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	2	1	7		3	9		6		2	8		4	
	3	2	8		4		1	7		3	9		6	
	4	3	9		6		2	8		4		1	7	
	5	4		1	7		3	9		6		2	8	
	6	6		2	8		4		1	7		3	9	
	7	7		3	9		6		2	8		4		1
	8	8		4		1	7		3	9		6		2
	9	9		6		2	8		4		1	7		3
	10		1	7		3	9		6		2	8		4
	11		2	8		4		1	7		3	9		6
	12		3	9		6		2	8		4		1	7
	13		4		1	7		3	9		6		2	8
	14		6		2	8		4		1	7		3	9

Abbildung 9: Plan der Messungen: An welchem Platz sitzt jede Blende in jedem Durchlauf?

Vor Beginn der Messungen wurden alle Blenden während einer halben Stunde in einem Aceton-Isopropanol-Gemisch im Ultraschallbad gereinigt und von da an nur noch mit der Pinzette am Rand manipuliert.

Das Einspannen der Blenden geht am einfachsten, indem der Blendenhalter von der Stage entfernt und horizontal auf den Tisch gelegt wird. Falls nicht alle Plätze belegt sind, sollten die freien Plätze mit schwarzem Papier abgedeckt werden, um eine Beeinflussung der benachbarten Plätze zu vermeiden. Bevor die Schrauben, die die Blenden festhalten, fest angezogen werden, muss überprüft werden, dass nirgends ein Teil der Blendenöffnung durch die Masken oder an ihnen haftenden Staub abgedeckt wird.

Bei dieser Gelegenheit kann vor der ersten Messung auch gerade die Irisblende richtig eingestellt werden. Ein Durchmesser von ca. 6 mm ist ideal, um sowohl ein ausgeprägtes Plateau als auch genügend Nullpunktssignal innerhalb des gesannten 12-mm-Quadrats zu haben.

4.2 Messprogramm

Die Messung wird gesteuert durch das LabVIEW-Programm *Aperture.vi*, das in Abbildung 10 gezeigt ist. Die Bedienungselemente des Programms sind folgende:

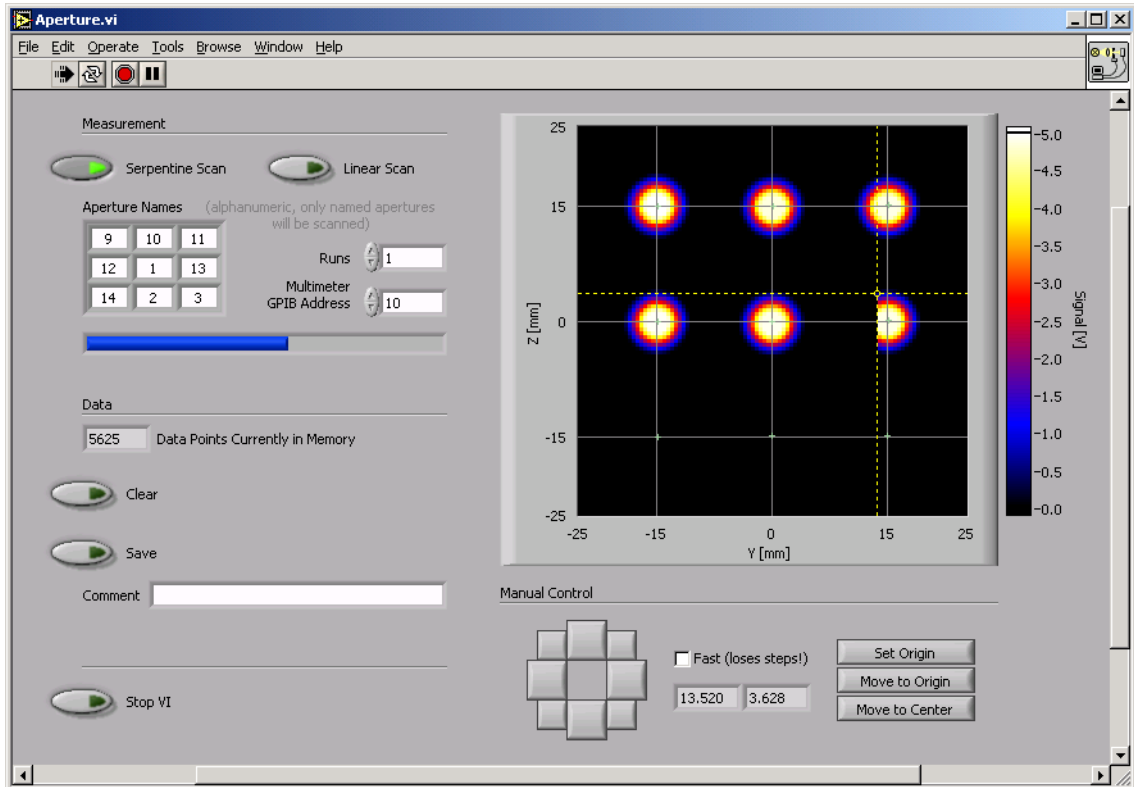


Abbildung 10: LabVIEW-Programm für die Blendenmessung: *Aperture.vi*

Graph. Der Hintergrund des Graphen stellt den Blendenhalter dar, von der Lichtquelle her gesehen, mit den Blenden ungefähr an den Kreuzungspunkten der 15-mm-Gitterlinien. Das gelbe Fadenkreuz steht für die Position des Lichtstrahles auf dem Blendenhalter. Das bedeutet, wenn sich der Blendenhalter nach links bewegt (positive Y-Richtung), dann bewegt sich das Fadenkreuz auf dem Graphen nach rechts! Die kleinen grünen Kreuze stehen für die aktuelle Position der entsprechenden Blende und liegen zu Beginn auf dem 15-mm-Gitter. Messwerte werden als Farbe des Hintergrunds nach der rechts angegebenen Skala dargestellt. Die Pixel sind 0.5 mm gross, zentriert auf ganzen Vielfachen von 0.5 mm, und nehmen die Farbe des letzten Messwerts an, der auf ihrem Gebiet genommen wurde. Das bedeutet, dass das Bild auf dem Graphen in jeder Richtung um bis zu 0.25 mm aus seiner tatsächlichen Position verschoben erscheinen kann!

Die Blendenplätze werden für die Bezugnahme in der Auswertung (und z.B. in Abbildung 9) zeilenweise von 1 bis 9 nummeriert, also 1 oben links, 2 oben Mitte, ..., 9 unten rechts.

Manuelle Bedienung der Stage. Die Zahlenfelder in der Mitte geben die aktuellen Koordinaten des Blendenhalters an. Mit den Richtungstasten auf der linken Seite kann die Stage herumgefahren werden. Die Richtungsangabe bezieht sich dabei auf den Blendenhalter, ist also umgekehrt zur Bewegungsrichtung des Fadenkreuzes auf dem Graphen. Kurzes Klicken fährt um 0.1 mm, gedrückt lassen kontinuierlich. Wenn das Feld *Fast* angekreuzt ist, werden die Pulse an die Schrittmotoren alle 3 ms statt alle 9 ms abgegeben, die Stage fährt also (nahezu) dreimal so schnell, es werden aber viele Pulse verloren, so dass die tatsächliche und die angegebene Position rasch ausser Übereinstimmung geraten. Wird dieser Modus verwendet, muss also die Position nachher wieder kalibriert werden.

Während des Herumfahrens werden alle 0.5 mm grobe Messwerte genommen und im Graphen dargestellt. So kann vor der ersten Messung oder wenn aus einem anderen Grund die Position unbekannt ist eine Grobkalibration durchgeführt werden: es wird herumgefahren, bis der helle Fleck der mittleren Blende im Graphen gefunden ist, dann wird einmal horizontal durch sein mutmassliches Zentrum gefahren und einmal vertikal, das Zentrum auf dem Bild abgeschätzt und angefahren. Dann können mit der Taste *Set Origin* die Koordinaten auf Null gesetzt werden. Für eine zuverlässige erste Messung sollte die Kalibration auf ca. 1 mm genau sein, eine genauere Kalibration wird ja später automatisch gemacht. Die Tasten *Move to Origin* und *Move to Center* fahren den Nullpunkt respektive das Zentrum der mittleren Blende an (was bei 2D-Scans wegen der automatischen Rekalibration dasselbe ist).

Blendennamen. Die 9 Textfelder dienen zu zwei Zwecken: Erstens kann in ihnen angegeben werden, welche Blende an welchem Platz sitzt. Diese Information wird in den Daten gespeichert und später vom Auswertungsprogramm verwendet. Zweitens geben sie an, welche Plätze besetzt sind: nur Plätze mit nicht-leerem Blendennamen werden gescannt (mit Ausnahme der Referenzblende im Zentrum, sie wird immer gescannt). Blendennamen dürfen keine Leerzeichen (Whitespace), Kommas und Semikolons enthalten und sollten 1 bis 3 Zeichen lang sein.

Anzahl Durchläufe. Das Feld *Runs* gibt an, wieviele Durchläufe über alle Prüflinge gemacht werden. M Durchläufe über N Prüflinge geben $2MN + 1$ 2D-Scans oder $M(2N + 1)$ lineare Scans.

Startknöpfe. Mit *Serpentine Scan* oder *Linear Scan* wird eine entsprechende Messung gestartet. Es sollte vorher genau überprüft werden, ob alles richtig eingestellt ist, da Messungen nicht auf sauberere Art unterbrochen werden können, als das VI zu stoppen (was zur Folge hat, dass die noch nicht gesicherten Daten im Speicher verlorengehen und der Fortschrittsbalken stehenbleibt).

Datenspeicher. Nach jedem vollendeten Scan werden die dabei gesammelten Datenpunkte an einen globalen Datenspeicher angehängt. Hier wird angezeigt, wieviele Datenpunkte der Speicher zur Zeit enthält. Mit *Clear* wird der Speicher gelöscht. *Save* sichert die gespeicherten Daten, zusammen mit den Blendennamen und einem optionalen einzeiligen Kommentar, in eine Textdatei, die später ausgewertet werden kann. Die Blendennamen werden erst zu diesem Zeitpunkt gespeichert, es ist also nicht möglich, mehrere Messungen mit verschiedenen Blendennamen in einer einzigen Datei zu speichern. Sichern und Beginnen einer neuen Messung löscht den Datenspeicher nicht – falls nicht dieselben Scans mehrfach gesichert werden sollen, muss dies manuell getan werden. Stoppen des VIs hingegen löscht den Speicher.

4.3 Start der Messung

Wenn der Blendenhalter wieder montiert und alle Geräte eingeschaltet sind (insbesondere die Lampen seit mindestens einer halben Stunde brennen), kann mit der Messung begonnen werden. Falls nötig wird wie oben erklärt die Stage grob auf Null justiert. Während der Messung muss das Zimmer abgedunkelt und auch der Monitor des Computers ausgeschaltet sein, das eigentliche Starten der Messung und ihre Überwachung müssen daher von ferne geschehen. Dazu können VNC¹ oder die «Remote Front Panel»-Funktionalität von LabVIEW verwendet werden.

5 Diskussion der Messdaten und Ablauf der Auswertung

5.1 Grobablauf

Die vom Messprogramm erstellten Dateien werden mit den Matlab-Programmen im Ordner *Evaluation* verarbeitet. Die Funktion *evaluate.m* nimmt einen Dateinamen als Argument, extrahiert aus der Datei einige globale Daten und teilt sie auf in die einzelnen Scans. Dann wird jeder Scan durchgegangen, entschieden, ob es sich um einen linearen oder einen 2D-Scan handelt, und entsprechend die Funktion *evaluate1D.m* oder *evaluate2D.m* aufgerufen. Diese verarbeitet den Scan zu einer Reihe interessanter Größen und speichert diese im globalen Struktur-Array *aperturescans*. Die Verarbeitung eines 2D-Scans wird im folgenden Abschnitt im Detail erklärt. Auf die linearen Scans soll hier nicht weiter eingegangen werden, weil sie für die Messungen nicht verwendet wurden. Falls es sich um die erste ausgewertete Datei handelt, wird zuletzt das Skript *plotevaluation.m* aufgerufen, das die in *aperturescans* gesammelten Daten der einzelnen Scans plottet und daraus zusammengefasste Größen wie die gesuchten Blendenflächenverhältnisse berechnet (andernfalls wird angenommen, dass der Benutzer wahrscheinlich noch weitere Dateien auswerten will und das etwas zeitraubende Skript am Schluss manuell ausführen wird).

Falls viele Dateien nacheinander ausgewertet werden müssen, kann mit dem kleinen Skript *evaluateall.m* etwas Tipparbeit gespart werden.

5.2 Auswertung eines 2D-Scans

Die Aktion der Funktion *evaluate2D.m* besteht aus den folgenden Schritten:

Nullpunktkorrektur. Um eventuelles Umgebungslicht und Offsets der Messinstrumente wegzukorrigieren, werden von den 625 Datenpunkten die tiefsten 200 ausgewählt und deren Mittelwert von allen Messwerten abgezogen. Mittelwert und Standardabweichung werden ausserdem zur Kontrolle ausgegeben. Üblicherweise befinden sich beide in der Größenordnung von einigen 10^{-6} V. Die durch dieses Verfahren eingeführten Fehler (z.B. werden häufig die Messpunkte in den äussersten Ecken etwas unter Null gedrückt) sind vernachlässigbar klein: Es kann angenommen werden, dass der Fehler der Nullpunktkorrektur und damit der Fehler ε im Integral für alle Blenden etwa derselbe ist. Für das Verhältnis zweier Integrale a und b gilt dann

$$\frac{a + \varepsilon}{b + \varepsilon} = \frac{a}{b} + \frac{b - a}{b} \frac{\varepsilon}{b} + O(\varepsilon^2).$$

¹ <http://www.tightvnc.org/>, <http://www.realvnc.com/>

Mit $(b - a)/b \approx 10^{-2}$ und $\varepsilon/b \approx 10^{-5}$ ist der Fehler $\approx 10^{-7}$ viel kleiner als die übrigen Ungenauigkeiten des Verfahrens ($\approx 10^{-3}$).

Zentrumsberechnung. Der Schwerpunkt der Messwerte wird als Zentrum der Blende angenommen. Dies funktioniert, solange das Zentrum nicht so weit vom Zentrum des untersuchten Quadrates entfernt liegt, dass ein Teil der Funktion abgeschnitten wird.

Integral. Durch doppelte Trapezintegration wird das Integral der bilinearen Interpolation der Messwerte bestimmt. (Falls die Werte auf dem Rand 0 sind, ist das dasselbe, wie wenn einfach alle Werte aufaddiert und mit dem Flächenstück $(0.5 \text{ mm})^2$ multipliziert würden.)

Hier stellte sich die Frage, wie gross der durch die relativ grobe Abtastung verursachte Fehler ist, d.h. wie stark der so gefundene Wert vom Integral einer unendlich fein abgetasteten Funktion abweicht (angenommen, dass die Einzelmessungen fehlerfrei sind). Diese Abweichung wurde an simulierten Daten untersucht. Je nach relativer Position von Abtastgitter und Funktion schwankte dabei der Wert des berechneten Integrals zwischen 0.9997 und 1.0005 des wahren Wertes. Diese Abweichung ist viel kleiner als die typische Abweichung der gemessenen Integrale zwischen zwei Scans derselben Blende und kann somit vernachlässigt werden.

Modell-Fit. Unter der Annahme, dass die untersuchte Blende und die Irisblende kreisförmig sind und die Beleuchtung homogen, kann die gemessene Funktion modelliert werden als Produkt der einfallenden Intensität mit der Faltung (der charakteristischen Funktionen) zweier Kreisscheiben, wie in Abschnitt 2 gezeigt. Die Faltung zweier Kreisscheiben ist äquivalent zur Bestimmung der Schnittfläche zweier Kreise, welche analytisch durchgeführt werden kann [3]. Damit kann eine Modellfunktion mit den 5 Parametern Zentrumskoordinaten (Y, Z) , Prüflingsradius, Irisradius und Beleuchtungsintensität aufgestellt werden, die mit Hilfe der Matlab-Funktion *fminsearch* in einem Least-Squares-Verfahren an die gemessenen Daten gefittet werden kann. Die Annahmen von Kreisförmigkeit (insbesondere der Irisblende) und homogener Beleuchtung sind in Wirklichkeit nicht besonders gut erfüllt, was auch an den relativ grossen Unsicherheiten der Fitparameter sichtbar wird (welche berechnet werden als diejenige Änderung an dem betrachteten Parameter, welche bei allen anderen Parametern festgehalten die Summe der quadratischen Fehler aufs Doppelte ansteigen lässt). Deshalb können die so gewonnenen Parameter nicht für weitere Berechnungen (z.B. der Blendenfläche aus dem Blendenradius) verwendet werden, sie eignen sich aber ganz gut als allgemeine Sanity Checks.

Plot. Zur visuellen Kontrolle werden die Daten in Matlab-Figur 4 geplottet. Datenpunkte, welche für die Nullpunktkorrektur verwendet wurden, werden mit fetten Punkten markiert. Gestrichelt wird die Fit-Funktion geplottet. Mit der Funktion *zoombot(i)* kann der Fuss der Daten von Platz i herangezoomt werden. *zoomtop(i)* zoomt entsprechend auf das Maximum von Platz i , und *zoomstd* kehrt zurück zur Standardansicht. Zur Illustration siehe Abbildungen 11 und 12 im nächsten Abschnitt.

5.3 Merkmale von Beispieldaten

Abbildung 11 zeigt einen Plot typischer Messdaten. Fette Punkte markieren die niedrigsten 200 Datenpunkte, die für die Nullpunktkorrektur verwendet wurden. Wie erwartet ist ein Plateau zu erkennen in dem Bereich, wo sich die Testblendenfläche ganz innerhalb der Irisblendenfläche befindet, und kein Signal in dem Bereich, wo sich die

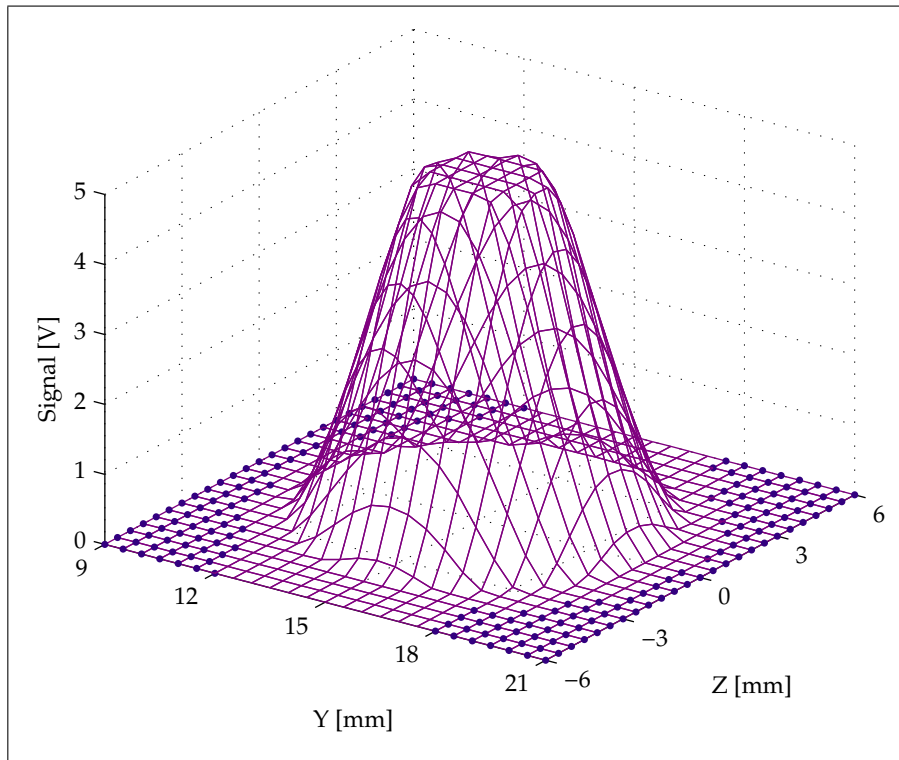


Abbildung 11: Typische Messdaten

beiden Flächen nicht überlappen. In der Vergrößerung, Abbildung 12, sind allerdings einige Abweichungen von diesem idealen Verhalten sichtbar:

- Am Fuss des Hügels treten in Z-Richtung Schultern auf, und darauf ein eigenartiges Zickzackmuster: Die Werte auf den Teilen des Scans, bei welchen aus dem Zentrum weg gefahren wurde, liegen höher als diejenigen, bei deren Messung auf das Zentrum zu gefahren wurde. Beides lässt sich erklären durch die endliche Impulsantwort der Kombination von Detektor, Verstärker und Multimeter. Es kann durch Versuch und Irrtum eine Impulsantwort gefunden werden, deren Dekonvolution aus den Messdaten entlang der Scanlinie die Artefakte verschwinden lässt und einen einigermaßen glatten und rotationsymmetrischen Hügel zurücklässt: $[1; 0.00013./(2:50).^2.5]$. Der Schwerpunkt dieser Impulsantwort liegt bei 0.36 ms, einer durchaus plausiblen Zeitkonstante für ein System, das für die Messung von DC-Signalen konzipiert ist.

Weil die Dekonvolution keinen Einfluss auf das Integral hat, wurde darauf verzichtet, diese Prozedur bei jeder Auswertung durchzuführen. Einzig die Nullpunktkorrektur könnte dadurch noch etwas verbessert werden, allerdings ist deren Genauigkeit wie schon erwähnt auch sonst ausreichend.

- Das Plateau ist nicht genau flach und horizontal, sondern etwas geneigt und leicht nach innen gekrümmt. Dies wurde bereits früher festgestellt [1] und da-

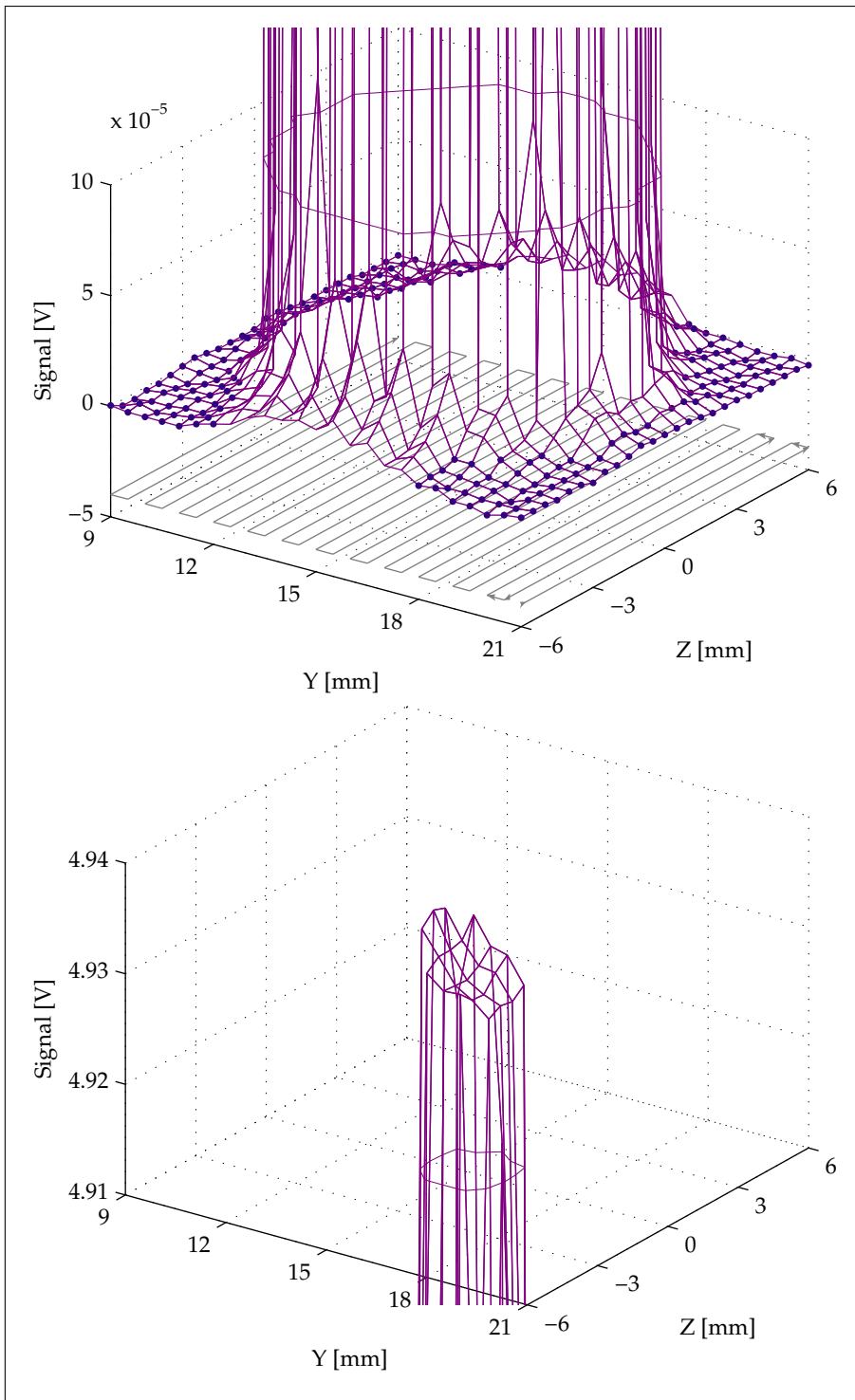


Abbildung 12: Typische Messdaten – Fuss und Plateau vergrößert; Scan-Reihenfolge

mals einer Inhomogenität der Beleuchtung durch eine nicht genau senkrecht stehende Linse zugeschrieben. Interessanterweise ist jedoch die Neigungsrichtung nicht für alle Blendenplätze dieselbe und kann sich auch beim Ein- und Ausbau von Blenden ändern, was daran zweifeln lässt, dass dies die ganze Erklärung ist. Es wurde ein Zusammenhang mit der Ausrichtung der Blende im Halter, insbesondere der Richtung des in Abbildung 4 sichtbaren Entlüftungsschlitzes, vermutet, doch es konnte in keiner Messung eine Korrelation festgestellt werden. Möglicherweise wird der Effekt irgendwie durch Reflexion am zylindrischen Teil der Blende verursacht. Eine starke Abhängigkeit davon, wie senkrecht die Blende im Strahl steht, könnte die beobachtete Zufälligkeit erklären. Die Krümmung des Plateaus ändert sich von leicht konkav auf stark konvex, falls die Masken zur Unterdrückung der Reflexion von der Blendenrückseite weggelassen werden (siehe Abschnitt 3.3).

5.4 Ausgabe der Endauswertung

Das Matlab-Skript *plotevaluation.m*, das nach der ersten Dateiauswertung automatisch aufgerufen wird und am Ende von mehreren Dateiauswertungen manuell aufgerufen werden muss, fasst die in der globalen Variablen *aperturescans* gesammelten Pro-Scan-Daten zusammen und gibt seine Ergebnisse in Plots und Tabellen aus, die hier kurz beschrieben werden sollen.

Figur 5: Integral und Fitparameter (Abbildung 13 links). Auf der oberen Figur wird das berechnete Integral jedes Scans gegen die Zeit geplottet. Falls für einen Scan der vorhergehende und der nachfolgende Scan von derselben Blende stammen, wird das Verhältnis des aktuellen Integrals zum Mittelwert der Nachbarintegrale gebildet und zusammen mit den Namen des Blendenpaars gespeichert. Als Unsicherheit für diesen Wert wird die halbe Differenz der Verhältnisse zum vorhergehenden und nachfolgenden Scan verwendet (was natürlich nur ein Teil des gesamten Messfehlers ist). Ausserdem wird aus dem Blendenradius, der aus dem Modell-Fit stammt, die Blendenfläche berechnet und im Hintergrund mit Fehlerbalken geplottet. Integral und Blendenfläche sollten proportional sein, und die Skalierung der Y-Achsen ist (mit Hilfe der anderen Fitparameter) so gewählt, dass die beiden Plots ungefähr übereinander fallen sollten. Weil es in Matlab etwas umständlich ist, zwei verschiedene Y-Achsen zu benutzen, verwenden beide Plots dieselbe Y-Achse, es werden einfach die Integrale, deren absoluter Betrag sowieso nicht interessiert, in beliebigen Einheiten angegeben.

Die untere Figur zeigt zwei weitere Fitparameter, den Strahlradius (Radius der Irisblende) und die Beleuchtungsintensität. Beide sollten ungefähr konstant bleiben, bei der Intensität kann direkt nach dem Einschalten der Lampen der exponentiell konvergierende Anstieg sichtbar sein. Auch hier werden, um Platz zu sparen, zwei unterschiedliche Grössen auf derselben Y-Achse angezeigt und deshalb die Einheit der einen angepasst.

Figur 6: Positionen und Rekalibration (Abbildung 13 rechts oben). Die Punkte stellen die Distanz des tatsächlichen Blendenzentrums vom entsprechenden Punkt auf dem 15-mm-Gitter für jeden Platz dar. Sie sollte innerhalb eines Durchlaufes ungefähr konstant bleiben, beim Auswechseln der Blenden kann sie sich ändern. Die graue Treppenkurve stellt Zeitpunkt und Betrag der automatischen Rekalibrationen dar (kumuliert, d.h. die Höhe einer Stufe entspricht dem Rekalibrationsbetrag). Beim ersten

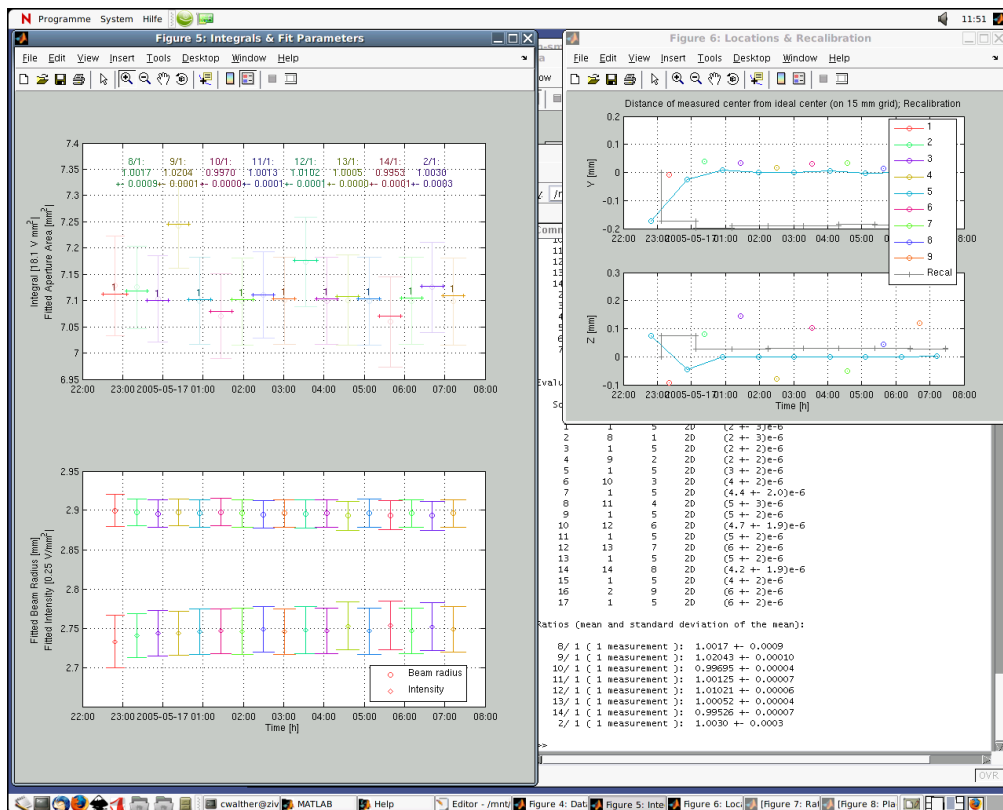


Abbildung 13: Teile der Ausgabe von *plotevaluation.m* (hier nach nur einer ausgewerteten Datei)

Referenz-Scan eines Durchlaufes kann wegen der Demontage des Blendenhalters eine grosse Rekalibration auftreten, falls auch bei den weiteren Rekalibrationen der kumulierte Betrag ständig wächst, deutet das darauf hin, dass die Stage schlecht funktioniert.

Figur 7 und Tabelle im Hauptfenster: Verhältnisse (Abbildung 14 im nächsten Abschnitt, Abbildung 13 rechts unten). Die über alle Durchläufe gesammelten Flächenverhältnisse (Integralverhältnisse) jedes Blendenpaars werden hier zusammengefasst. Um den Verhältnissen mit grösserer Unsicherheit (bezogen auf vorangehenden und nachfolgenden Referenzscan, siehe oben) weniger Gewicht einzuräumen, wird für jedes Blendenpaar folgendes Verfahren angewendet: Die (ungewichtete) Standardabweichung aller Werte dient als Schätzung der Fehler, die nicht in der erwähnten Einzelunsicherheit enthalten sind. Zu dieser wird für jeden Punkt die Einzelunsicherheit addiert und das Reziproke der Summe als Gewicht für diesen Punkt verwendet. Damit wird ein gewichteter Mittelwert und eine gewichtete Standardabweichung berechnet, dazu die Standardabweichung der Mittelwertes, die bei N Punkten \sqrt{N} mal kleiner ist.

Figur 8: Platzfaktoren (Abbildung 15 im nächsten Abschnitt). Nachdem dieselbe Blende an verschiedenen Plätzen gemessen worden ist, kann untersucht werden, ob es systematische Unterschiede zwischen den einzelnen Plätzen gibt. Dazu wird das

in jedem einzelnen Scan gemessene Flächenverhältnis dividiert durch das gemittelte Endresultat für die entsprechende Blende und dieser Wert dem entsprechenden Platz zugewiesen. Alle diese Werte sowie Mittelwert und Standardabweichung für jeden Platz werden in dieser Figur geplottet.

6 Resultate

Die Endresultate für die Flächenverhältnisse der LYRA-Blenden, berechnet wie oben beschrieben, sind graphisch dargestellt in [Abbildung 14](#). [Tabelle 1](#) führt sie zusammen mit den aus der Metas-Messung der Referenzblende errechneten absoluten Blendenflächen auf.

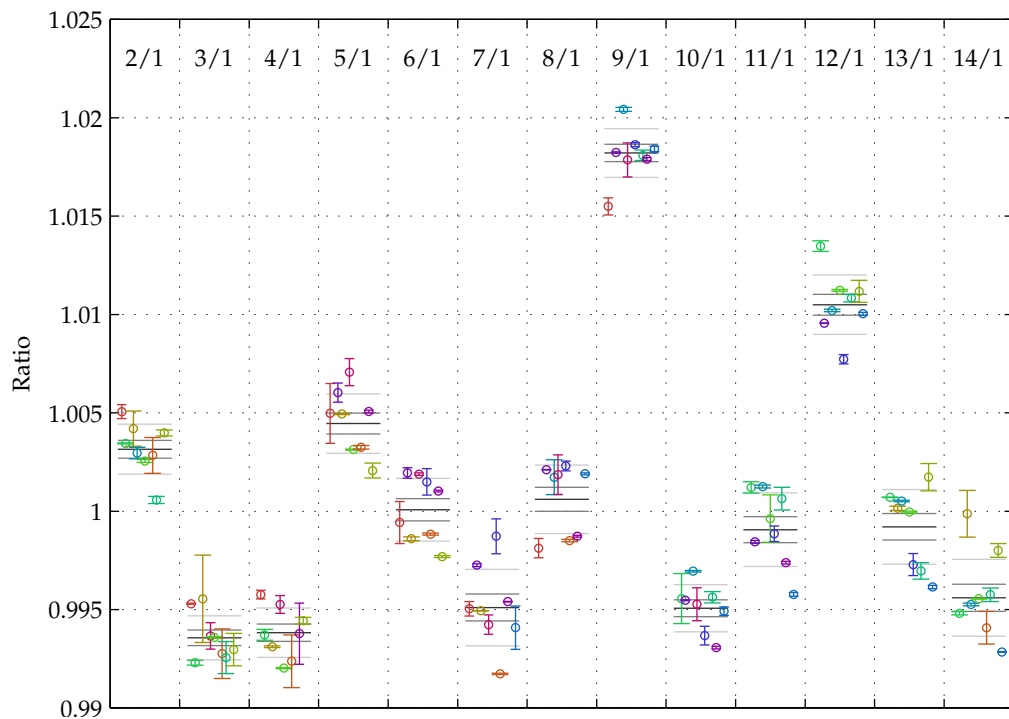


Abbildung 14: Flächenverhältnisse der Blenden 2–14 zu Blende 1. Kreise: einzelne Messung (Mittelwert der Verhältnisse zur vorhergehenden und nachfolgenden Messung der Referenzblende 1). Fehlerbalken: Differenz der Vergleiche zu vorhergehender und nachfolgender Referenzmessung. Schwarze und graue Linien: Gewichteter Mittelwert, Standardabweichung des Mittelwerts, Standardabweichung.

Das Resultat der beschriebenen Platzfaktor-Analyse zeigt [Abbildung 15](#). Es ist tatsächlich ein leichter Einfluss des Platzes sichtbar, auch wenn fast alle Plätze sowohl über als auch unter 1 streuen. Woher dieser stammt, darüber kann nur spekuliert werden. Haben die oberen Plätze höhere Faktoren, weil über den Rand des Blendenhalters Streulicht auf den Detektor gelangt?

Blende	Flächenverhältnis zu Blende 1			Fläche [mm ²]	
	μ	σ	σ_μ	μ	σ_μ
1	1			7.1160 ± 0.0008	
2	1.0031	0.0013	0.0004	7.138 ± 0.003	
3	0.9936	0.0011	0.0004	7.070 ± 0.003	
4	0.9938	0.0013	0.0004	7.072 ± 0.003	
5	1.0045	0.0015	0.0005	7.148 ± 0.004	
6	1.0001	0.0016	0.0006	7.117 ± 0.004	
7	0.9951	0.0019	0.0007	7.081 ± 0.005	
8	1.0006	0.0017	0.0006	7.120 ± 0.004	
9	1.0182	0.0012	0.0004	7.246 ± 0.003	
10	0.9951	0.0012	0.0004	7.081 ± 0.003	
11	0.9991	0.0019	0.0007	7.109 ± 0.005	
12	1.0105	0.0015	0.0005	7.191 ± 0.004	
13	0.9992	0.0019	0.0007	7.110 ± 0.005	
14	0.9956	0.0020	0.0007	7.085 ± 0.005	

μ : Mittelwert σ : Standardabweichung
 σ_μ : Standardabweichung des Mittelwerts

Tabelle 1: Endresultate

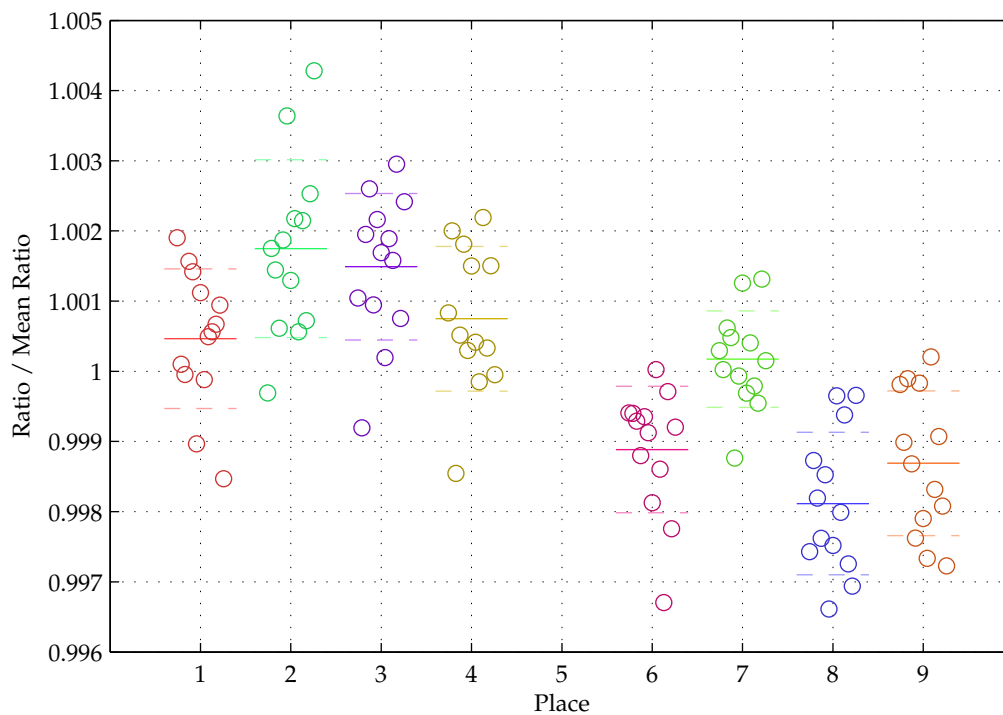


Abbildung 15: Platzfaktoren

Literatur

- [1] Lars Konersmann, *Zusammenfassung der Tests Blendenmess-Apperatur*, <smb://obsun/pmod/BlendenMessApparatur/README.doc> (2003)
- [2] Christian Walther, *Genauigkeit der Schrittmotor-Y-Z-Stage der Blendenmessapparatur*, [smb://obsun/pmod/Blendenmessung LYRA 2005/Stage-Genauigkeit/Stage-Genauigkeit.pdf](smb://obsun/pmod/Blendenmessung_LYRA_2005/Stage-Genauigkeit/Stage-Genauigkeit.pdf) (2005)
- [3] Eric W. Weisstein, *Circle-Circle Intersection*, <http://mathworld.wolfram.com/Circle-CircleIntersection.html>