

Fakultät für Physik und Astronomie
Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg

Untersuchung von
Lichtleitern
zur Homogenisierung von
Faserkalorimetern

Die Diplomarbeit wurde von Andreas Hatzenbühler ausgeführt am
Institut für Hochenergiephysik der Universität Heidelberg
unter der Betreuung von
Prof. Dr. K. Meier

Mai 1995

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Die Funktion von Lichtmischern am Beispiel des SPACAL	5
2.1	Faserkalorimeter	5
2.2	Das SPACAL	6
2.3	Photomultiplier	7
2.4	Lichtmischer	8
2.5	Grundlagen der geometrischen Optik	10
2.5.1	Lichtstrahlen an dielektrischen Grenzflächen	10
2.5.2	Der Verlauf reflektierter Lichtstrahlen in Prismen	11
2.5.3	Abbildende Optik	12
3	Der Meßaufbau	15
3.1	Übersicht	15
3.2	Der Fahrtisch	15
3.2.1	Die Schrittmotoren	16
3.2.2	Die Steuerelektronik	19
3.3	Die Optik	20
3.3.1	Die Lichtquelle	20
3.3.2	Die CCD-Kamera	21
3.3.3	Die Frame-Grabber-Karte	22
3.3.4	Die Streuscheibe	23
3.3.5	Das Objektiv	23
3.4	Die Datennahme	24
3.4.1	Das Programm „ccdtool“	24
3.4.2	Datenkonvertierung zur Auswertung	24
3.4.3	Bildverarbeitung mit Apple-Macintosh	25
4	Die Eichung der Meßapparatur	27
4.1	Der Scantisch	27
4.2	Die Optik	29
4.2.1	Die Lichtquelle	29
4.2.2	Das Rauschen	30
4.2.3	Die Linearität der Kamera	32
4.2.4	Das Abbildungsverhältnis	33
4.2.5	Die Ortsauflösung	35

5	Meßergebnisse	37
5.1	Einführung	37
5.2	Pyramidenförmiger Lichtmischer	37
5.2.1	Die Geometrie der vermessenen Lichtmischer	37
5.2.2	Die Lichtverteilung an der Ausgangsfläche	38
5.2.3	Die Lichtmenge am Ausgangsfenster	39
5.2.4	Die Homogenität der Ausleuchtung der Ausgangsfläche	44
5.2.5	Die Gesamthomogenität	47
5.2.6	Der SPACAL-Lichtmischer	48
5.3	Neue Lichtmischergeometrien	50
5.3.1	Lichtmischer mit konvexen Seitenflächen	50
5.3.2	Lichtmischer mit konkaven Seitenflächen	51
5.3.3	Ein konischer Lichtmischer mit dreieckigem Querschnitt	53
6	Die Simulation	57
6.1	Das Programm	57
6.2	Die Resultate	58
6.2.1	Die Lichtverteilung auf der Ausgangsfläche	58
6.2.2	Die komplette Simulation eines Scandurchgangs	59
7	Zusammenfassung	61
A	Die Schrittmotorsteuerung	65
A.1	Allgemeines	65
A.2	Die Hardware-Umgebung	65
A.2.1	Die VME-Bus-Interface-Karte A 201	65
A.2.2	Die Isel-Schrittmotor-Leistungskarte	66
A.2.3	Die Arbeitsweise	68
A.2.4	Die Ansteuerung	69
A.3	Die Hardware	70
A.3.1	Das Steuerungsmodul	70
A.3.2	Die Zusatzplatine	71
A.3.3	Die Einstellung der Betriebsparameter mit der Handsteuerung	72
A.4	Der Device-Driver	75
B	Das Programmpaket zur Datennahme	77
B.1	Das Programm „ccdtool“	77
B.1.1	Der Programmaufruf	77
B.1.2	Der Bildschirmaufbau	78
B.1.3	Das Hauptmenu	78
B.1.4	Das Aufnahmemenu	79
B.1.5	Das Punktmessungsmenu	80
B.1.6	Das Motorsteuerungsmenu	81
B.1.7	Das Datenformat	82
B.2	Die Programme zur Datenkonvertierung	82
B.2.1	readpic [name.pic] bookpic [hbookfile] [ID]	82
B.2.2	read2pic [name] book2pic [hbookfile] [ID]	82
B.2.3	readscan [name] [X] [Z] bookscan [hbookfile] [ID]	82
B.2.4	readpic [name.pic] [abs] photgen [filename]	83

Kapitel 1

Einleitung

„Entdecken was die Welt, im Innersten zusammenhält¹“

Dieses Zitat verleiht einer alten Sehnsucht der Menschheit Ausdruck. Einer der Wege, diesem Geheimnis weiter auf die Spur zu kommen, stellen die Streuversuche der Hochenergiephysik dar. In ihnen werden „elementare“ Teilchen wie Elektronen, Positronen, Protonen, ... bei enormen Energien zur Kollision gebracht. Aus dem Ablauf der folgenden Reaktion und den beobachteten Endprodukten versucht man, neue Erkenntnisse über den Aufbau der Materie zu gewinnen.

Das DESY² in Hamburg ist die größte deutsche Versuchsanlage für Hochenergiephysik. Sie besitzt seit 1991 den 6.3 km langen unterirdischen Beschleunigungsring HERA³. In ihm werden 27.5 GeV Positronen an zwei Punkten mit 820 GeV Protonen zur Kollision gebracht.

An einem dieser Wechselwirkungspunkte steht der Detektor H1. Er besteht aus einer Vielzahl einzelner, rotationssymmetrisch um die Strahlachse angeordneter Meßsysteme, zur Bestimmung von Flugbahn, Impuls und Energie aller Reaktionsprodukte. Entlang der Strahlachse ist der Detektor asymmetrisch aufgebaut, was dem unterschiedlichen Anfangsimpuls der Reaktionspartner gerecht wird. Um ein System von Spurkammern, das den Wechselwirkungspunkt umgibt, befindet sich in Flugrichtung der Protonen ein Flüssig-Argon-Kalorimeter. Diese Seite wird als der Vorwärtsbereich des Detektors bezeichnet. Im rückwärtigen Bereich des Detektors, entsprechend der Flugrichtung der einlaufenden Elektronen, befand sich bis 1994 das BEMC⁴, um die Energie von schwach gestreuten Elektronen zu messen.

Im Winter 1994/95 wurde an Stelle des BEMC ein neues, sogenanntes Spaghetti-Kalorimeter im rückwärtigen Bereich des Detektors montiert. Es überdeckt einen größeren Winkelbereich (152° bis 178° gemessen bezüglich der Flugrichtung der Protonen [H1P 93]) als das BEMC (155° bis 176° [H1D 93]). Dabei vergrößert der geringere Abstand zum Strahl, der durch ein verkleinertes Strahlrohr erreicht wurde, den kinematischen Bereich des Detektors wesentlich. Zudem soll das SPACAL⁵ die Energie- und Ortsauflösung verbessern und die Elektron-Pion- Identifikation und die Zeitmes-

¹nach J. W. von Goethe

²Deutsches Elektronen Synchrotron

³Hadron Elektron Ring Accelerator

⁴Backward-Electromagnetic-Kalorimeter

⁵Spaghetti-Kalorimeter

sung ermöglichen.

Da es eines der ersten Faserkalorimeter ist, das in einem großen Experiment zum Einsatz kommt, traten während seiner Planungs- und Bauphase viele prinzipiellen Fragen zur Lösung von Detailproblemen auf.

Eines dieser Details ist die optimale optische Ankopplung der, zur Auslese verwendeten Photomultiplier an die Szintillationsfaser. Im SPACAL fanden nach Vorversuchen spezielle Lichtleiter, sogenannte Lichtmischer, für diese Aufgabe Verwendung.

Ziel dieser Arbeit war erstens der Aufbau einer Apparatur zur Untersuchung von Wirkungsprinzip und Effektivität von Lichtmischern, und zum zweiten die Vermessung und Bewertung verschiedener Lichtmischerformen mit dieser Apparatur.

Kapitel 2

Die Funktion von Lichtmischern am Beispiel des SPACAL

2.1 Faserkalorimeter

In der Hochenergiephysik werden Kalorimeter zur Bestimmung von Teilchenenergien genutzt. Sie beruhen darauf, daß Teilchen ihre Energie durch eine Vielzahl von Stoß- und Ionisationsprozessen an das Kalorimetermaterial abgeben. Diese, vom Teilchen im Material deponierte Energie, wird teilweise zu Licht und kann auf photoelektronischem Weg gemessen werden.

Die zu einem Auslesekanal zusammengefaßten Bereiche eines Kalorimeters werden als Module bezeichnet. Kennt man den Platz der einzelnen Module, so läßt sich zusätzlich der Auftreffort des Teilchens bestimmen.

Bei der Wechselwirkung des primären Teilchens mit dem Kalorimetermaterial entstehen sogenannte Sekundärteilchen. Sie besitzen anfangs genug Energie, selbst weitere Teilchen zu erzeugen. So entsteht eine, als Schauer bezeichnete Lawine. Ihre Ausbreitung stoppt, sobald die Energie ihrer Teilchen nicht mehr zur Produktion neuer Sekundärteilchen ausreicht. Die Ausdehnung eines Schauers wird durch folgende zwei Größen beschrieben:

Wechselwirkungslänge: Sie ist definiert als die im Material durchlaufene Strecke, auf der das Teilchen seine Energie bis auf $1/e$ seines Anfangswertes abgegeben hat. Sie ist vom Teilchen, seiner Energie und dem verwendeten Absorptionsmaterial abhängig.

Molière Radius: Er ist definiert als der Radius des in Ausbreitungsrichtung des Schauers liegenden Zylinders, in dem 90% der Schauerenergie enthalten sind.

Bei der technischen Ausführung unterscheidet man Homogene- und Sampling-Kalorimeter.

In Ersterem entsteht das Licht direkt im Absorbermaterial der einzelnen Module, wie z. B. bei Natrium-Jodid mit Tellur-Dotierung [Pov 93]. Sie erreichen eine gute Energieauflösung. Jedoch zeigen die geeigneten Materialien eine relativ große Wechselwirkungslänge und einen großen Molière-Radius, so daß die Module sehr groß gewählt werden müssen.

Im Gegensatz dazu werden bei Sampling-Kalorimetern verschiedene Materialien für Absorption und Szintillation zu einem Modul kombiniert. Während das Teilchen in den Absorberschichten abgebremst wird, regt der im Szintillator deponierte Teil der Energie diesen zum Leuchten an. Durch Verwendung von Materialien mit kleiner Wechselwirkungslänge lassen sich so sehr kompakte Kalorimeter bauen. Allerdings erreichen sie eine schlechtere Lichtausbeute, da der Hauptteil der Energie im Absorber deponiert wird und somit nicht zur Lichterzeugung beiträgt.

Ein Beispiel für ein Sampling-Kalorimeter ist das BEMC in „Sandwich-Bauweise“. Ca. $16\text{ cm} \times 16\text{ cm}$ große Platten aus Blei und Plastikszintillator sind in mehreren Schichten senkrecht zur Flugrichtung des Teilchen angeordnet.

Das Szintillationslicht wird an den Modulseiten durch Wellenlängenschieber gesammelt und zur Auslese mit Photodioden weitergeleitet. Bedingt durch die Wellenlängenschieber entstehen zwischen den Kalorimetermodulen Lücken, in denen die Energie durchfliegender Teilchen nur unvollständig detektiert wird.

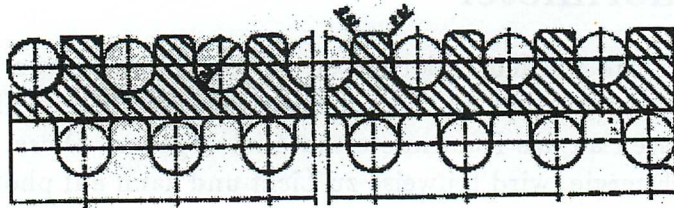


Abbildung 2.1: Die Anordnung der Szintillationsfasern in den Bleiplatten

Eine moderne Sampling-Kalorimeter Bauform stellen Faserkalorimeter dar. Gemäß Abbildung 2.1 werden Szintillationsfasern in gerillte Absorberplatten eingelegt, und diese dann zur Größe eines Kalorimetermoduls übereinander geschichtet. Auf der Rückseite des Moduls werden die Fasern gebündelt und per Photomultiplier ausgelesen. Gegenüber der „Sandwich-Bauweise“ weist diese Anordnung folgende Vorteile auf:

- Viele einzelne Module können lückenlos zu großen Kalorimetern aneinandergesetzt werden.
- Das Kalorimetermaterial erscheint bezüglich des Schauervolumens homogen. Dadurch werden elektromagnetische Schauer schmaler und lassen sich besser von Pionschauern unterscheiden.

2.2 Das SPACAL

Das im Januar 1995 in den Detektor H1 eingebaute SPACAL besitzt einen hadronischen und einen elektromagnetischen Teil [H1P 93].

Der hadronische Teil besteht aus 136 Modulen, aus Bleiplatten, in die Fasern mit 1 mm Durchmesser in einem Blei-zu-Faser-Verhältnis von 4:1 eingelegt wurden. Es hat eine Tiefe von 20 cm , was einer hadronischen Wechselwirkungslänge entspricht.

Der elektromagnetische Teil ist aus 1192 $4\text{ cm} \times 4\text{ cm} \times 25\text{ cm}$ großen Modulen aufgebaut. In den Bleiplatten der einzelnen Module sind Fasern mit einem Durchmesser

von 0,5 mm mit einem Blei-zu-Faser-Verhältnis von 2:1 eingelegt. Die Module des elektromagnetischen Teils besitzen damit eine Tiefe von 27 Strahlungslängen. Jedes der Module wird von einem Fine-Mesh-Photomultiplier (siehe Kapitel 2.3) ausgelesen der mit einem Lichtmischer (siehe Kapitel 2.4) an die gebündelten Fasern angekoppelt ist.

2.3 Photomultiplier

Photomultiplier sind elektronische Vakuumröhren, die zum Nachweis kleinster Lichtmengen benutzt werden. Abbildung 2.2 zeigt ihren prinzipiellen Aufbau. Der auf hohem negativen Potential liegenden Kathode folgen Dynoden in mehreren Potentialstufen. Trifft nun ein Photon durch das Fenster auf die geeignet bedampfte Kathode, schlägt es durch den Photoeffekt Elektronen aus ihr heraus. Sie werden durch das elektrische Feld zur ersten Dynode hinbeschleunigt. Durch den Energiezuwachs ist es ihnen nun wiederum möglich, Elektronen aus dieser Dynode herauszuschlagen. Der Vorgang wiederholt sich an den folgenden Dynoden so, daß sich die anfangs erzeugten Elektronen lawinenartig bis zur Anode verstärken und dort als Strom gemessen werden können. Photomultiplier können über 10 Dynoden besitzen und erreichen Verstärkungen von 10^6 bis 10^8 [Hec 94].

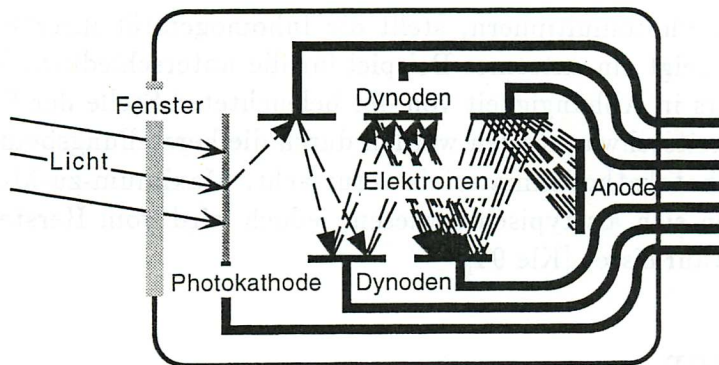


Abbildung 2.2: Schematischer Aufbau eines Photomultipliers

Die Kunst im Bau von Photomultipliern ist, die Dynoden so zu formen und anzuordnen, daß das elektrische Feld zwischen ihnen möglichst alle entstehenden Elektronen zur nächsten Dynode weiterbeschleunigt. Dies wird durch die Anwesenheit von starken Magnetfeldern wie im H1-Detektor zusätzlich erschwert.

Für das SPACAL wurden daher spezielle Photomultiplier gewählt, deren Dynoden durch feine, parallel hintereinander liegende Gitter gebildet werden. Solche Fine-Mesh-Photomultiplier erreichen im Magnetfeld noch eine ausreichende Verstärkung [Jan 93].

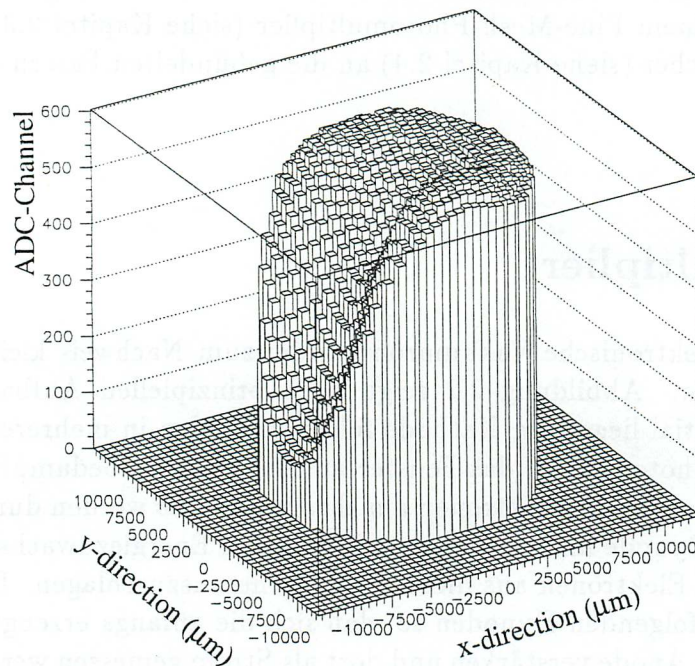


Abbildung 2.3: *Empfindlichkeit einer sehr schlechten Photomultiplierkathode*

Ein weiteres Problem von Photomultipliern, stellt die Inhomogenität ihrer Photokathode dar. Abbildung 2.3 zeigt ein extremes Beispiel für die unterschiedliche Verstärkung eines Photomultipliers in Abhängigkeit von der beleuchteten Stelle der Photokathode. Diese Empfindlichkeitsschwankungen werden durch die herstellungsbedingt unterschiedliche Dicke des Photokathodenmaterials verursacht. Maximum-zu-Minimum-Verhältnisse von 1,5 haben sich als typisch erwiesen, jedoch wird vom Hersteller nur ein Verhältnis von 2,5 gewährleistet [Kle 94].

2.4 Lichtmischer

Der Schauer eines Elektrons im SPACAL hat einen Molièreradius von 2 cm [Ste 95]. Nur in diesem Bereich eines $4\text{ cm} \times 4\text{ cm}$ großen Moduls werden die Szintillationsfasern zum Leuchten angeregt. Die am Modulende gebündelten Fasern des SPACAL stellen ein System dar, das zusammenhängende Bereiche des Moduls auf zusammenhängende Bereiche der Photokathode abbildet. Daher wird, je nach Ort des Schauers im Modul, ein anderes Gebiet der Photokathode beleuchtet. Unterschiedliche Empfindlichkeiten der Photokathode ergeben so, bei gleicher Lichtmenge, verschieden große Signale, je nach dem, wo im Modul das Elektron seine Energie deponiert hat. Die Inhomogenitäten der einzelnen Photomultiplierkathoden verursachen daher eine Unsicherheit in der Energiemessung.

Um diesem Effekt entgegenzuwirken, wird nun zwischen den Faserenden und dem Photomultiplier ein spezieller Lichtleiter angebracht. Er soll das Licht aus dem Faserbündel derart zum Photomultiplier weiterleiten, daß dessen aktive Fläche möglichst

gleichmäßig beleuchtet wird, unabhängig, aus welcher Faser des Bündels das Licht in den Lichtleiter eintritt. Die Ortsinformation an seiner Eingangsseite wird also zugunsten der Homogenität an der Ausgangsfläche vermischt. Diesem speziellen Lichtleitertyp wurde der Name Lichtmischer gegeben.

Kegelstümpfe aus Plexiglas haben sich als eine geeignete Form für diese Aufgabe erwiesen. Mit ihr wird zusätzlich die Querschnittsfläche des Faserbündels an die kleinere Photokathode angepaßt.

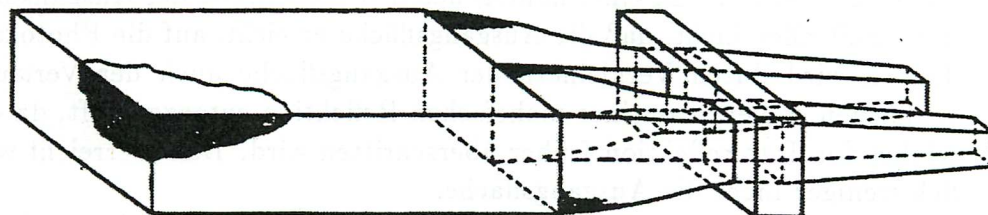


Abbildung 2.4: Zeichnung eines SPACAL-Submoduls [Leh 94].
Links der Bleiplattenstapel der die Fasern enthält welche rechts herauskommen, gebündelt und an den Lichtmischer angekoppelt werden. Auf seine Ausgangsfläche wird der Photomultiplier angeklebt.

Der aus einer Faser austretende Lichtkegel würde am Ende des Lichtmischers eine Fläche beleuchten, die größer als die Ausgangsfläche des Lichtmischers ist. Die über die Ausgangsfläche hinausragenden Teile werden daher von den Seitenflächen des Lichtmischers durch Reflektion auf die Ausgangsfläche gespiegelt.

Der Mischungsvorgang läßt sich prinzipiell wie folgt beschreiben: Die Querschnittsfläche des aus der Faser in den Lichtmischer eintretenden Lichtkegels weitet sich auf dem Weg zur Ausgangsfläche auf.

Je nach Größenverhältnis von Lichtkegel zu Ausgangsfläche werden Teile des Lichtkegels mehrfach reflektiert. Dieser Vorgang ist dem Falten eines runden Papierstücks auf ein kleineres Quadrat vergleichbar. Diese Überlagerung verschiedener Bereiche des Lichtkegels führt zu einer gleichmäßigeren Ausleuchtung der Ausgangsfläche.

Je größer die gedachte Endfläche des Lichtkegels im Verhältnis zur Ausgangsfläche des Lichtmischers ist, desto homogener wird diese ausgeleuchtet. Ein Lichtmischer wird unter anderem bestimmt durch seine Eingangsfläche, seine Länge und seine Ausgangsfläche. Ihre Variation hat folgende Einflüsse auf das Mischungsverhalten:

Eingangsfläche: Sie ist nach unten begrenzt durch die Größe des Faserbündels, das an sie angekoppelt wird. Eine Vergrößerung der Eingangsfläche hat steiler verlaufende Seitenflächen zur Folge. Dies verringert auf der einen Seite die Anzahl der möglichen Totalreflektionen, auf der anderen Seite wird das Licht über einen weiteren Bereich verschmiert.

Länge: Je länger der Lichtmischer ist, umso mehr Faltungen wird die gedachte Lichtkegel-Endfläche auf die Ausgangsfläche abbilden. Die Seitenflächen verlaufen flacher und ermöglichen mehrfache Reflektionen (siehe Kapitel 2.5.2). Zudem

werden stetige Intensitätsschwankungen im Lichtkegel auf einen größeren Bereich abgebildet, was zusätzlich eine homogene Ausleuchtung der Endfläche begünstigt. Jedoch ist die maximale Länge des Lichtmischers durch den Wunsch nach einer kompakten Bauform des Kalorimeters beschränkt.

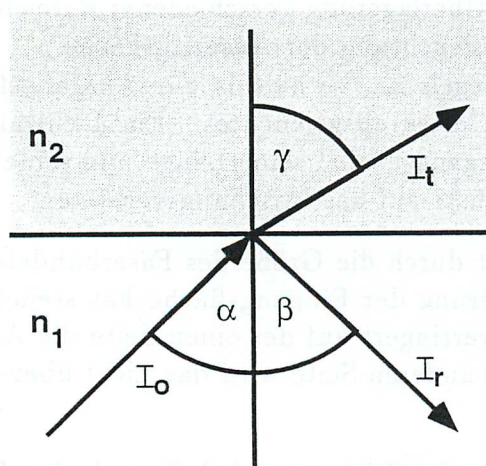
Ausgangsfläche: Die Größe der Ausgangsfläche wird an die Größe der Photokathode angelehnt. Ob es dabei von Vorteil ist, die Ausgangsfläche kleiner oder größer als die Photokathode zu machen, ist nicht ohne weiteres abzuschätzen. Eine kleinere Ausgangsfläche hat die mehrfache Faltung der gedachten Lichtkegel-Endfläche zur Folge und führt zu einer homogeneren Ausleuchtung der Ausgangsfläche. Zudem trifft alles Licht, daß die Ausgangsfläche erreicht, auf die Photokathode. Jedoch wird durch Verkleinern der Ausgangsfläche auch der Verlauf der Seitenflächen steiler, was einer mehrfachen Reflektion entgegenläuft, da der Grenzwinkel der Totalreflektion früher überschritten wird. Daher erreicht wahrscheinlich weniger Licht die Ausgangsfläche.

Bei einer großen Ausgangsfläche erwartet man eine verlustfreiere Lichtführung von der Eingangsfläche zur Ausgangsfläche. Jedoch trifft nicht mehr alles Licht, das die Ausgangsfläche erreicht, auf die Photokathode und wird daher nicht nachgewiesen. Zudem wirkt sich das Auslassen der Eckbereiche der Ausgangsfläche eventuell auf die Beleuchtungshomogenität der Photokathode aus.

2.5 Grundlagen der geometrischen Optik

Zur Erklärung der Lichtverteilung an der Ausgangsfläche des Lichtmischers werden folgende Gesetze der geometrischen Optik herangezogen [Bor 72]:

2.5.1 Lichtstrahlen an dielektrischen Grenzflächen



- I_0 = einfallender Lichtstrahl
- I_r = reflektierter Lichtstrahl
- I_t = durchgehender Lichtstrahl
- n_1 = Brechungsindex von Medium 1
- n_2 = Brechungsindex von Medium 2
- α = Winkel des einfallenden Strahls
- β = Winkel des reflektierten Strahls
- γ = Winkel des durchgehenden Strahls

Abbildung 2.5: Brechung und Reflexion eines Lichtstrahls an einer Grenzfläche

Licht, das unter einem Winkel α auf die Grenzfläche zweier Medien mit unterschiedlichem Brechungsindex trifft, wird dort ganz oder teilweise reflektiert. Dabei gilt für den reflektierten Strahl immer:

$$\text{Einfallswinkel } \alpha = \text{Ausfallswinkel } \beta$$

Für den Winkel des durchgehenden Strahls gilt das Snellius-Brechungsgesetz:

$$\frac{\sin(\alpha)}{\sin(\gamma)} = \frac{n_2}{n_1}$$

α = Einfallswinkel im Medium 1
 γ = Ausfallswinkel im Medium 2
 n_1 = Brechungsindex im Medium 1
 n_2 = Brechungsindex im Medium 2

Die Intensität des einfallenden Strahls teilt sich, entsprechend der Fresnelschen Formeln für Reflektion und Brechung an Grenzschichten, in die beiden Teilstrahlen auf.

Fall 1: \vec{E}_0 des einfallenden Lichtstrahls liegt parallel zur Einfallsebene.

$$\frac{|\vec{E}_r|}{|\vec{E}_o|} = \frac{\tan(\alpha - \gamma)}{\tan(\alpha + \gamma)} \qquad \frac{|\vec{E}_t|}{|\vec{E}_o|} = \frac{2\sin(\gamma)\cos(\alpha)}{\sin(\alpha + \gamma)\cos(\alpha - \gamma)}$$

Fall 2: $\vec{E} \perp 0$ des einfallenden Lichtstrahls liegt senkrecht zur Einfallsebene.

$$\frac{|\vec{E}_r|}{|\vec{E}_o|} = -\frac{\sin(\alpha - \gamma)}{\sin(\alpha + \gamma)} \qquad \frac{|\vec{E}_t|}{|\vec{E}_o|} = \frac{2\sin(\gamma)\cos(\alpha)}{\sin(\alpha + \gamma)}$$

Für die Intensität $I \propto |\vec{E}|^2$ von unpolarisiertem Licht muß von durchgehendem und reflektiertem Licht jeweils das Mittel aus den quadratischen Feldstärken genommen werden:

$$\frac{I_r}{I_0} = \frac{1}{2} \left(\frac{\tan(\alpha - \gamma)^2}{\tan(\alpha + \gamma)^2} + \frac{\sin(\alpha - \gamma)^2}{\sin(\alpha + \gamma)^2} \right) \qquad \frac{I_t}{I_0} = \frac{\sin(2\alpha)\sin(2\gamma)}{2\sin(\alpha + \gamma)^2} \left(1 + \frac{1}{\cos(\alpha - \gamma)^2} \right)$$

2.5.2 Der Verlauf reflektierter Lichtstrahlen in Prismen

Eine Konstruktionshilfe für den Verlauf eines mehrfach reflektierten Lichtstrahls innerhalb eines prismenförmigen Körpers stellt das Verfahren in Abbildung 2.6 dar:

Statt des Strahls wird der Körper an der reflektierenden Ebene gespiegelt und der Lichtstrahl geradlinig in diesen gespiegelten Körper verlängert. Unter Verwendung dieser Konstruktion lassen sich sofort folgende Feststellungen für konisch zulaufende Körper tätigen:

- Der Einfallswinkel des Lichtstrahls vergrößert sich bei jeder Reflektion um den Öffnungswinkel des Konus. Somit ist nach wenigen Reflektionen der Grenzwinkel der Totalreflektion überschritten, und die Intensität des Lichtstrahls, der sich weiter im Körper ausbreitet, nimmt stark ab.
- Selbst wenn die Seitenflächen des Konus ideal reflektierend wären, würden nicht alle Lichtstrahlen die Ausgangsfläche erreichen, sondern zur Eintrittsfläche zurückgeleitet werden.

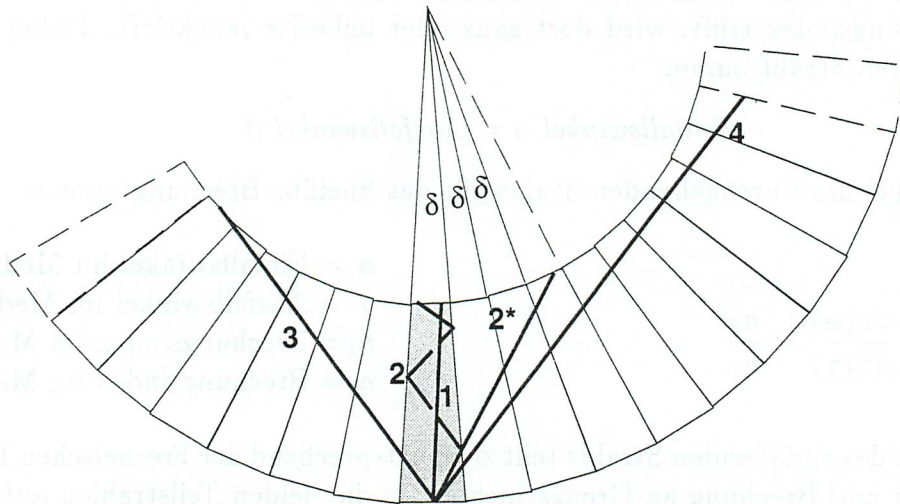


Abbildung 2.6: Konstruktionshilfe für reflektierte Strahlen.

2 : Strahlverlauf innerhalb des Körpers

2* : Strahl 2 entsprechender gerader Strahl im mehrfach gespiegelten Körper

2.5.3 Abbildende Optik

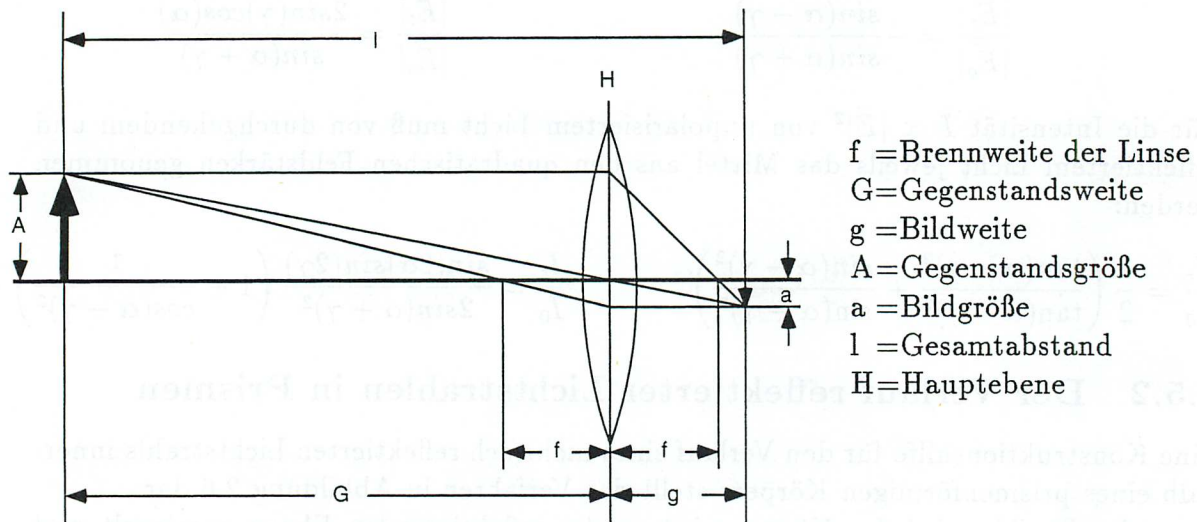


Abbildung 2.7: Abbildungsgeometrie einer dünnen konvexen Linse

Als Abbildende Optik bezeichnet man Systeme, die Lichtstrahlen, welche von einem Punkt abgestrahlt werden, wieder in einem anderen Punkt vereinen. Im einfachsten Fall dient dazu, entsprechend Abbildung 2.7, eine schmale Konvexlinse.

Ihr optisches Verhalten kann vereinfacht so dargestellt werden, daß alle durch sie hindurchtretenden Strahlen an einer sogenannten Hauptebene ihre Richtung ändern. Dabei werden Lichtstrahlen, die parallel zur optischen Achse die Hauptebene erreichen, hinter dieser zum Brennpunkt der Linse gebrochen. Entsprechend verlassen vom Brennpunkt kommende Strahlen die Hauptebene parallel zur optischen Achse. Der

Lichtstrahl, der durch den Schnittpunkt von optischer Achse und Hauptebene verläuft, passiert die Linse ungebrochen. Aus Abbildung 2.7 lassen sich folgende Beziehungen mit den Strahlensätzen ableiten:

$$\text{Abbildungsverhältnis } V = \frac{A}{a} = \frac{G}{g} = \frac{G-f}{f} = \frac{f}{g-f}$$

Aus den letzten beiden Termen folgt das Abbildungsgesetz:

$$\frac{1}{G} + \frac{1}{g} = \frac{1}{f}$$

Mit $G + g = l$ läßt sich V nur mit l und f ausdrücken:

$$V = \frac{1}{2f} \left(l - 2f + \sqrt{l^2 - 4lf} \right)$$

Ist die Brennweite bekannt und ein bestimmter Abbildungsmaßstab gewünscht, folgt für l :

$$l = f \left(V + \frac{1}{V} + 2 \right)$$

Durch verschieben der Linse entlang der optischen Achse läßt sich das über den Abstand von Gegenstandsebene und Bildebene eingestellte Abbildungsverhältnis scharf stellen.

14KAPITEL 2. DIE FUNKTION VON LICHTMISCHERN AM BEISPIEL DES SPACAL

Die Abbildung T ist ein Möbiustransformation, die durch den Schnittpunkt von optischen Achse und Hauptebene verläuft. Die Abbildung T lässt sich folgendermaßen beschreiben:

$$T(z) = \frac{z - u}{z - v} \cdot \frac{v - w}{u - w}$$

Die Abbildung T ist ein Möbiustransformation, die durch den Schnittpunkt von optischer Achse und Hauptebene verläuft.

$$T(z) = \frac{z - u}{z - v} \cdot \frac{v - w}{u - w}$$

Die Abbildung T ist ein Möbiustransformation, die durch den Schnittpunkt von optischer Achse und Hauptebene verläuft.

$$T(z) = \frac{z - u}{z - v} \cdot \frac{v - w}{u - w}$$

Die Abbildung T ist ein Möbiustransformation, die durch den Schnittpunkt von optischer Achse und Hauptebene verläuft.

$$T(z) = \frac{z - u}{z - v} \cdot \frac{v - w}{u - w}$$

Die Abbildung T ist ein Möbiustransformation, die durch den Schnittpunkt von optischer Achse und Hauptebene verläuft.

Kapitel 3

Der Meßaufbau

3.1 Übersicht

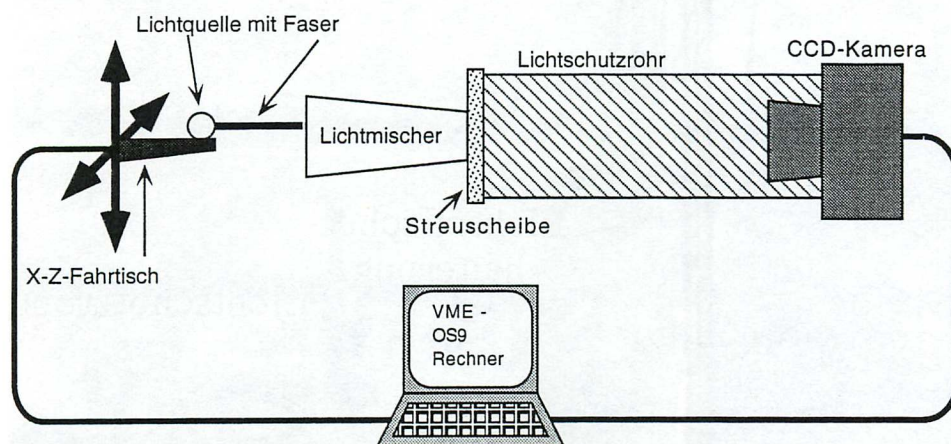


Abbildung 3.1: *Prinzipieller Aufbau der Meßapparatur*

Abbildung 3.1 zeigt eine Prinzipskizze der Meßapparatur. Der zu vermessende Lichtmischer wird mit einer Lichtleitfaser beleuchtet, die mittels eines X-Z-Fahrtisches auf seiner Eingangsseite positioniert wird. An seiner Ausgangsfläche befindet sich eine mit optischem Fett angekoppelte Streuscheibe. Sie imitiert als Leinwand die aktive Fläche des Photomultipliers. Das Bild auf der Streuscheibe wird dann von einer CCD¹-Kamera aufgenommen, digitalisiert und steht somit einer systematischen Untersuchung zur Verfügung.

Zum Schutz vor Fremdlicht befindet sich die gesamte Apparatur in einem abgedunkelten Raum.

3.2 Der Fahrtisch

Der X-Z-Fahrtisch wurde von der mechanischen Werkstatt des Instituts mit Komponenten der Firma Isel gebaut, und setzt sich aus zwei, im Prinzip gleichen Linearverstelleinheiten zusammen. Jede der beiden Linearverstelleinheiten besteht aus

¹charge-coupled-device

einer Spezialschiene, auf der ein, mit vier Rollen gelagerter, Wagen läuft. Dieser wird von einer Kugelgewindespindel mit Schrittmotorantrieb wohldefiniert bewegt. Die Steigung der Gewindespindeln beträgt 4 mm / Umdrehung mit einer Genauigkeit von $\leq 50 \mu\text{m} / 300 \text{ mm Länge}$ [IsK 94]. Bei einem Schrittwinkel von $1,8 \text{ Grad}$ im Vollschrittbetrieb erhält man eine Schrittweite von $20 \mu\text{m}$, bzw. $10 \mu\text{m}$ im Halbschrittbetrieb.

Die X -Verstelleinheit ist fest mit dem Grundgerüst verbunden. Auf ihrem Wagen ist die Z-Verstelleinheit montiert (siehe Abbildung 3.2).

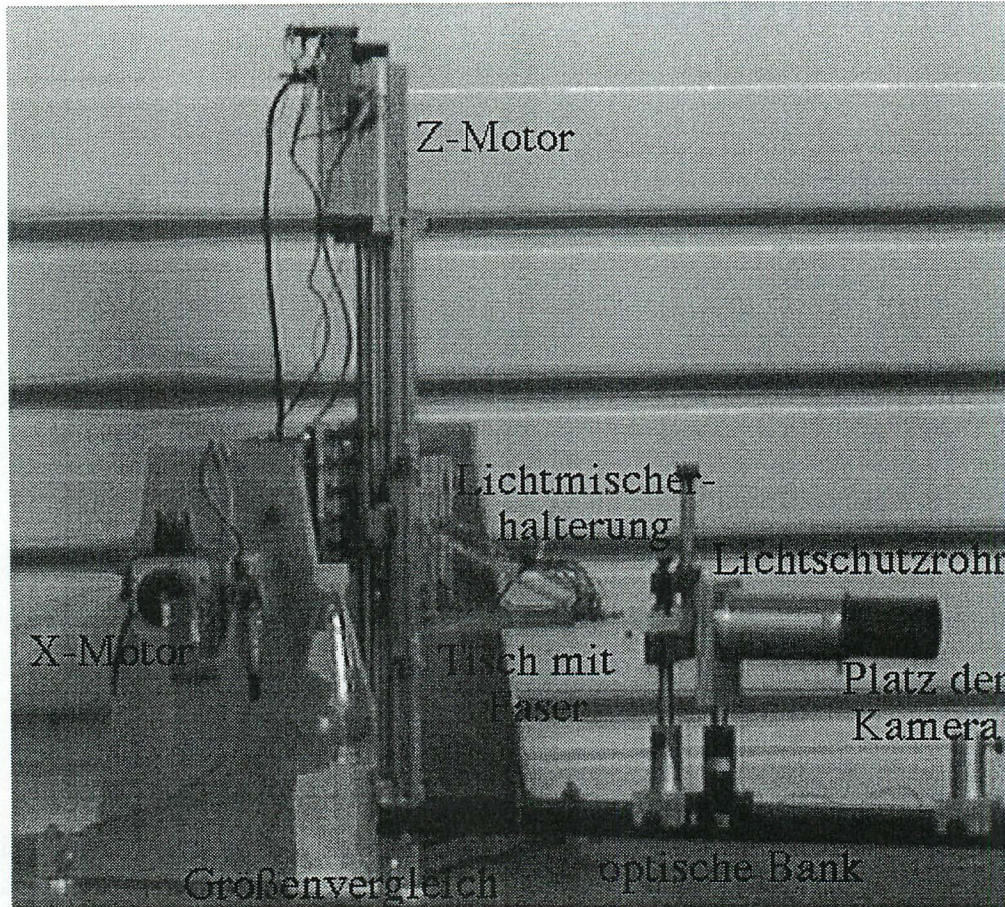


Abbildung 3.2: Gesamtansicht des Aufbaus

3.2.1 Die Schrittmotoren

Schrittmotoren entsprechen in Aufbau und Wirkungsweise bürstenlosen Gleichstrommotoren. Bei 2-Phasen-Schrittmotoren lassen sich zwei versetzte Statorspulensysteme separat steuern. Geschieht dies in einer geeigneten Reihenfolge, so entsteht ein rotierendes Magnetfeld, dem der Rotor folgt. Dabei unterscheidet man entsprechend Abbildung 3.3 zwischen Voll- und Halbschrittbetrieb. In ersterem wiederholt sich die Ansteuerungssequenz der Spulen alle 4, bei Halbschrittbetrieb alle 8 Schritte. Bei den für den Aufbau gewählten Motoren besteht der Rotor aus einem axial magnetisierten Permanentmagneten, auf dessen Enden jeweils eine gezahnte Weicheisenkappe sitzt. Diese sind so ausgerichtet, daß sich jeweils Zahn und Zahnücke gegenüberstehen (siehe Abbildung 3.4.) Der Stator ist aus 8 Spulen mit gezahnten Weicheisenkernen

aufgebaut. Je 4 Spulen bilden die beiden Spuleneinheiten. Die Schrittauflösung des Motors ist von der Anzahl der Stator- und Rotorzähne abhängig.

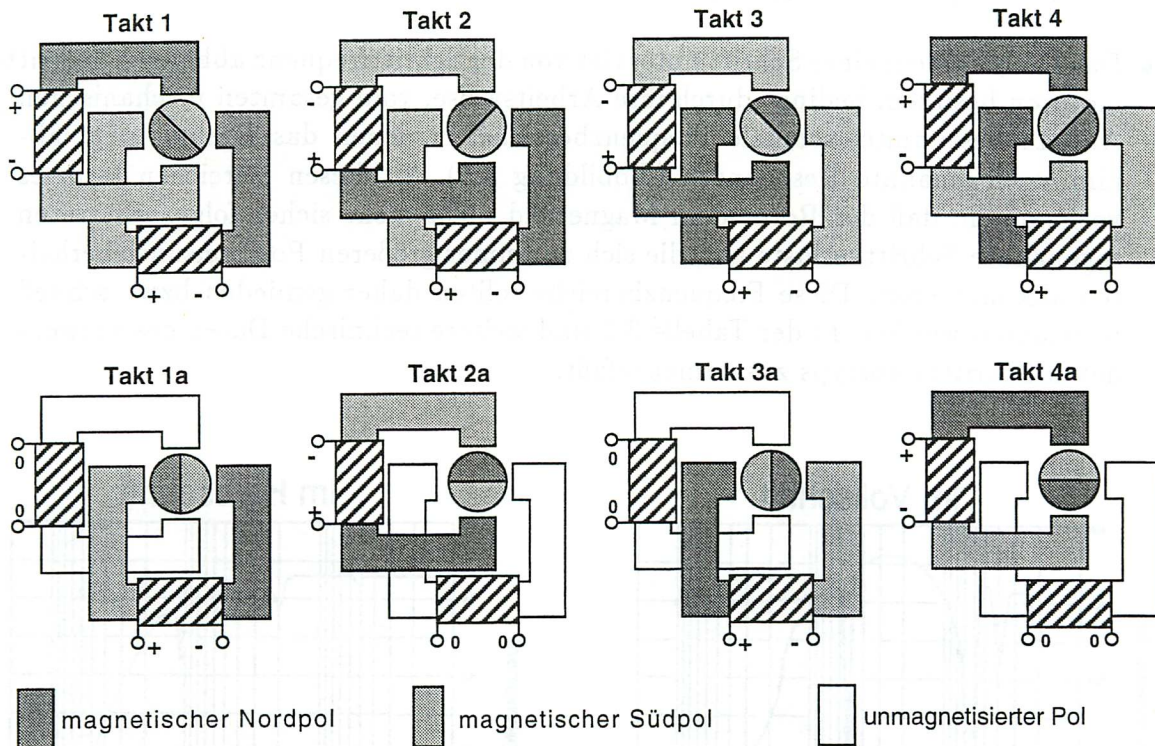


Abbildung 3.3: Im Vollschrittbetrieb werden die Phasen 1 – 4 durchlaufen.

Im Halbschrittbetrieb kommen die vier unteren Phasen, in denen eine der Spulen stromlos ist dazu (1a – 4a).

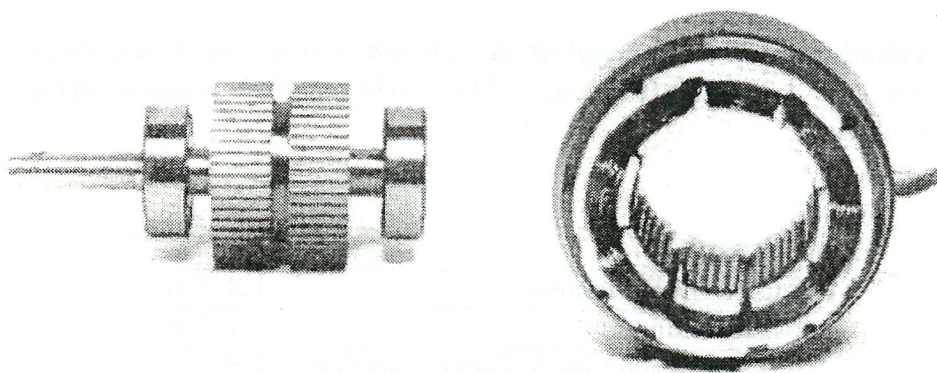


Abbildung 3.4: Rotor und Stator eines Schrittmotors

Damit der Rotor jedem Schritt des Magnetfeldes folgt, sind folgende Eigenschaften von Schrittmotoren zu beachten:

- Ein sicheres Starten und Stoppen nach einem bestimmten Schritt ist nur bei Schrittfrequenzen unter 500 Hz gewährleistet. Um höhere Verfahrensgeschwindigkeiten zu erreichen, muß die Schrittfrequenz auf die gewünschte Endgeschwindigkeit

beschleunigt und rechtzeitig vor der Zielposition wieder abgebremst werden. Für diese sogenannten Start-Stop-Rampen empfiehlt sich ein exponentieller Verlauf mit einer maximalen Steigung bis zu 100 Hz/ms . So kann man, je nach Last, Geschwindigkeiten von $10\,000 \text{ Schritten/Sekunde}$ erreichen.

- Das Drehmoment eines Schrittmotors ist von der Schrittfrequenz abhängig. Schrittmotoren besitzen, bedingt durch ihre Arbeitsweise, vom gesamten mechanischen Aufbau bestimmte, schmale Frequenzbereiche, in denen das Drehmoment abnimmt, sogenannte Resonanzen (Abbildung 3.5). In diesen Bereichen kann es vorkommen, daß der Rotor dem Magnetfeld nicht mehr sicher folgt. Es treten sogenannte Schrittverluste auf, die sich zu immer größeren Positionsunsicherheiten akkumulieren. Diese Frequenzbereiche sollten daher gemieden bzw. schnell überfahren werden. In der Tabelle 3.1 sind weitere technische Daten des verwendeten Schrittmotortyps zusammengefaßt.

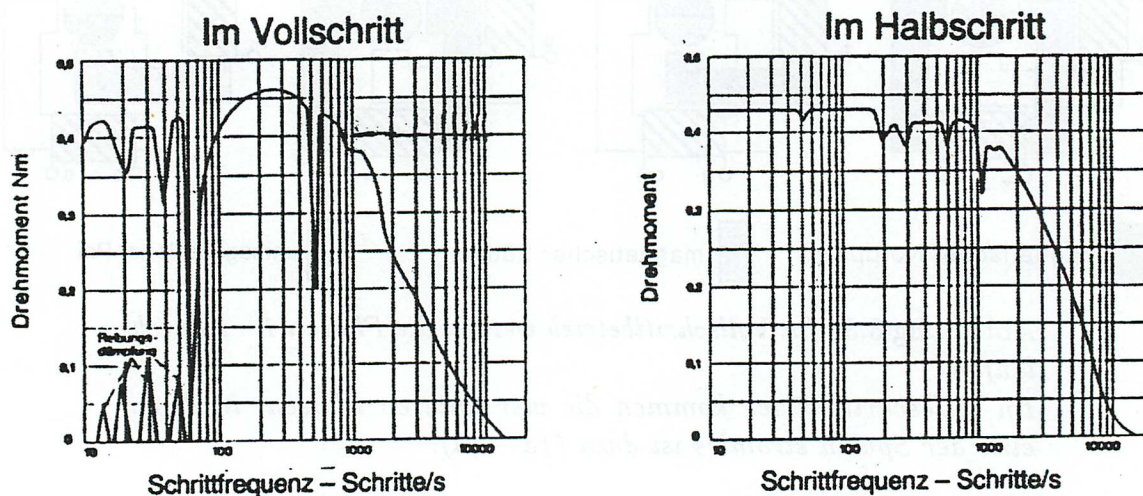


Abbildung 3.5: Abhängigkeit des Drehmoments von Schrittmotoren von der Schrittfrequenz. Man sieht deutlich resonanzartige Einbrüche.

max. Drehmoment	1,2 Nm
Haltemoment	1,4 Nm
Schrittwinkel im Vollschrittbetrieb	1,8 °
Schrittwinkel im Halbschrittbetrieb	0,9 °
Nennspannung	1,7 V
Wicklungswiderstand	1,2 Ω
Wicklungsinduktivität	2,1 mH
Maximaler Spulenstrom	4,1 A

Tabelle 3.1: Technische Daten des verwendeten Schrittmotortyps

3.2.2 Die Steuerelektronik

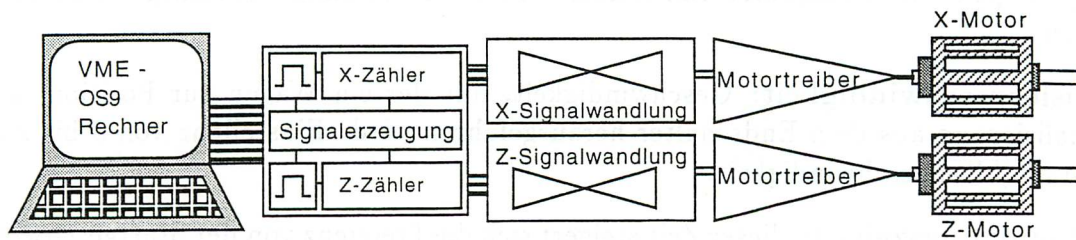


Abbildung 3.6: Blockschaltbild der Motorsteuerung.

Da Schrittmotoren elektrische Signale in definierte Drehwinkel umsetzen, kann im Positionierbetrieb auf einen geschlossenen Regelkreis verzichtet werden. Die Ansteuerung setzt sich nach Abbildung 3.6 aus folgenden Einheiten zusammen:

Rechner mit Steuerprogramm zur Verwaltung der Ist-Position und Berechnung von Richtung und Schrittzahl zur Soll-Position.

Signalerzeugung zum Generieren einer, der Schrittzahl entsprechenden, Folge von Takten und der begleitenden Steuersignale.

Signalwandlung zur Umsetzung der digitalen Steuersignale in die Ansteuerungssignale der Motorspulen.

Motortreiber als strombegrenzte Leistungsendstufen für die Statorspulen.

Zur Signalwandlung wurde für jeden Motor die ISEL Schrittmotorleistungskarte UMS2 [Ise 88], verwendet die auch den Motortreiber schon enthält. Sie läßt sich mit folgenden Eingangssignalen steuern:

Takt: Mit jeder fallenden Flanke dreht der Motor einen Schritt weiter.

Taktabschaltung: Zum frequenzunabhängigen Stoppen des Schrittmotors.

Richtung: Definiert die Drehrichtung der Motoren.

Voll-/Halbschritt: Bestimmt die Betriebsart der Motoren.

Die im Rahmen der Diplomarbeit gebaute Signalerzeugungseinheit besteht pro Motor aus einem abstimmbaren Oszillator mit programmierbarem Zähler. Ihre Steuerlogik verwaltet das Beschleunigen und Abbremsen nach einstellbaren Parametern.

Erreicht der Wagen einen Endschalter, wird er gestoppt und automatisch so weit zurückgefahren, bis der Endschalter sich wieder löst. Damit läßt sich die Position über einen Endschalter initialisieren. Dessen Wiederholgenauigkeit geht wesentlich in die Wiederholgenauigkeit des Fahrtisches ein.

Aufgebaut wurde die Signalerzeugung als Aufsteckmodul zur A201-Interface Karte für VME-Bus Rechner. Die Verbindung zum Betriebssystem OS-9 stellt der eigens dafür programmierte Device-Driver her. Nach dem Starten der Motoren übernimmt das Modul die Motorsteuerung und Signalerzeugung entsprechend folgender, für jeden Motor voreingestellter, Parameter:

maximale Verfahrgeschwindigkeit: Einstellbar bis 10 000 *Schritte/Sekunde*

Start-/Stopgeschwindigkeit: Einstellbar von 0 bis maximale Verfahrgeschwindigkeit.

Initialisierungsgeschwindigkeit: Geschwindigkeit, mit der ein Wagen zur Positionsinitialisierung aus dem Endschalter herausgefahren wird. Einstellbar von 0 bis zur Start-/Stopgeschwindigkeit.

Beschleunigungszeit: In dieser Zeit steigert sich die Frequenz von der Startgeschwindigkeit zur maximalen Verfahrgeschwindigkeit und umgekehrt. Einstellbar von 0-1 s.

Bremsweg: Anzahl der Schritte vor Erreichen der Zielposition, von der ab die Verfahrgeschwindigkeit auf die Stoppgeschwindigkeit gesenkt wird. Einstellbar in 8 Stufen.

Spulenstrom: Einstellbar an der ISEL-Schrittmotorleistungskarte von 0 - 2 A.

Der Rechner kann, während die Motoren laufen, sein Programm weiter ausführen. Nachdem beide Motoren die Zielposition oder einen Endschalter erreicht haben, löst das Modul einen Interrupt aus, oder das Programm erkennt das Stoppen beider Motoren durch wiederholtes Abfragen eines Statusflags.

Über das Statusregister läßt sich auch feststellen, ob ein Motor nun die gewünschte Position erreicht hat, oder zuvor an den Anschlag gefahren ist.

3.3 Die Optik

3.3.1 Die Lichtquelle

Als Lichtquelle dient eine 5 mm LED, deren Licht wie folgt beschrieben in eine Plexiglasfaser eingekoppelt wird:

Die von der Umhüllung befreiten Enden der Fasern wurden so in eine Plexiglashülse mit 5 mm Außendurchmesser gesteckt und verklebt, daß ein Teil des unisolierten Faserendes aus der Hülse ragte. Dieses wurde abgeschnitten und die gesamte Fläche plangeschliffen und poliert. Eine, bis knapp über dem leuchtenden Kristall gekürzte und polierte LED wurde nun mit der, die Fasern enthaltenden Hülse verklebt, so daß nach Augenschein die maximal mögliche Lichtmenge in die Fasern einkoppelt. Das Austrittsende der Faser wurde dann entweder mit oder ohne vorheriger Abisolierung poliert. Nach Ummanteln von LED und Hülse mit einem schwarzen Schrumpfschlauch wurde die komplette Einheit auf einer Europlatine befestigt, wobei eine Messinghülse mit passendem Durchmesser das Faserende fixiert. Um Reflektionen am Rand dieser Messinghülse zu vermeiden, wurde auch sie mit einem schwarzen Schrumpfschlauch ummantelt.

Als Stromquelle diente ein von 0 - 40 Volt regelbares Netzgerät und ein 1000 Ohm Vorwiderstand.

Zum Vergleich der Winkelverteilung des Lichtes aus dem Faserende mit der Winkelverteilung am Ende der Szintillationsfasern, wurde entsprechend der oben beschriebenen Weise eine lange Faser mit 1 mm Durchmesser in eine Plastikhülse geklebt. Ebenso

wurden 7 30 mm lange original SPACAL-Fasern in eine entsprechende Hülse gefaßt und mit der 1 mm Faser verklebt. Die 7 Szintillationsfasern wurden dann in einem Nachbarraum von einer Quecksilberdampfampe bestrahlt und ihr Licht unter Einhaltung möglichst großer Krümmungsradien zur Scanapparatur geleitet. Durch Abdunkeln eines Teils der Szintillationsfasern ließ sich die Lichtintensität regeln.

3.3.2 Die CCD-Kamera

Das CCD-Prinzip beruht auf dem Transport von diskreten Ladungspaketen. Zwischen einem positiv dotierten Halbleiterkristall und einer dünnen negativ dotierten Schicht bildet sich ein p-n-Übergang. Darüber liegen von einer Isolationschicht getrennt, einzelne Elektroden. Unter den Elektroden, an denen positive Spannung anliegt, befinden sich Mulden im Potentialverlauf des p-n-Übergangs, in denen sich Ladungen befinden. Nimmt man nun die Spannung von der Elektrode weg und legt sie an eine benachbarte Elektrode an, so wandert die Potentialmulde mit den darin enthaltenen Elektronen unter diese Elektrode.

Legt man in einer Reihe jeweils nicht benachbarte Elektroden auf die gleiche Steuerspannung und legt sie abwechselnd auf hohes und niederes Potential, so sind die Ladungspakete jeweils durch einen Potentialwall voneinander getrennt. Ein, durch asymmetrische Dotierung erzeugter, Potentialverlauf unter jeder Elektrode bestimmt die Richtung, in der sich die Elektronen bewegen, wenn die Spannung an den Elektroden wechselt. Diese Anordnung dient so als analoges Schieberegister, in dem sich diskrete Elektronenpakete, durch einen Takt kontrolliert, auf dem Chip bewegen lassen (siehe Abbildung 3.7).

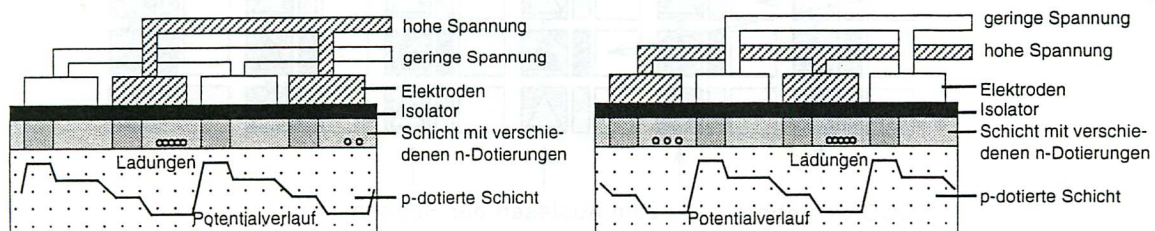


Abbildung 3.7: Ladungstransport in einem CCD-Schieberegister

Die lichtempfindlichen Pixel der Kamera werden durch nichtabgedunkelte Bereiche der Sperrschicht gebildet, in denen auftreffendes Licht freie Ladungen erzeugt. Diese sammeln sich dort, bis sie, von einer Gate-Elektrode gesteuert, in ein benachbartes Schieberegisterelement abfließen können.

Eine Spalte der aktiven Fläche des Kamera-Chips wird durch eine Reihe solcher Pixel mit Gate-Elektrode und parallel verlaufendem CCD-Schieberegister gebildet.

Viele solcher Spalten nebeneinander ergeben die gesamte aktive Fläche. Die einzelnen Schieberegisterspalten münden oben in ein horizontales CCD-Register (Abbildung 3.8). Der Auslesevorgang beginnt nun damit, daß alle Gate-Elektroden einer ungeraden Zeile die im zugehörigen Pixel gesammelten Ladungen in das benachbarte Registerelement fließen lassen. Die Registerelemente der geraden Zeilen dienen dabei als

Potentialwalle zur Trennung der Ladungspakete, die somit zum Zeilenregister transportiert werden. In dieses werden nun nacheinander die einzelnen Zeilen geladen und zum Ausgangsverstärker geführt. Er wandelt die ankommenden Ladungssequenzen direkt in die analogen Video-Zeilensignale (BAS-Signal²) des ersten Halbbildes um. Sind alle ungeradzahigen Zeilen bearbeitet, so werden die geradzahigen Zeilen in gleicher Weise ausgelesen und ergeben das zweite Halbbild. Somit entspricht das erhaltene Videosignal automatisch dem üblichen interleave Format.

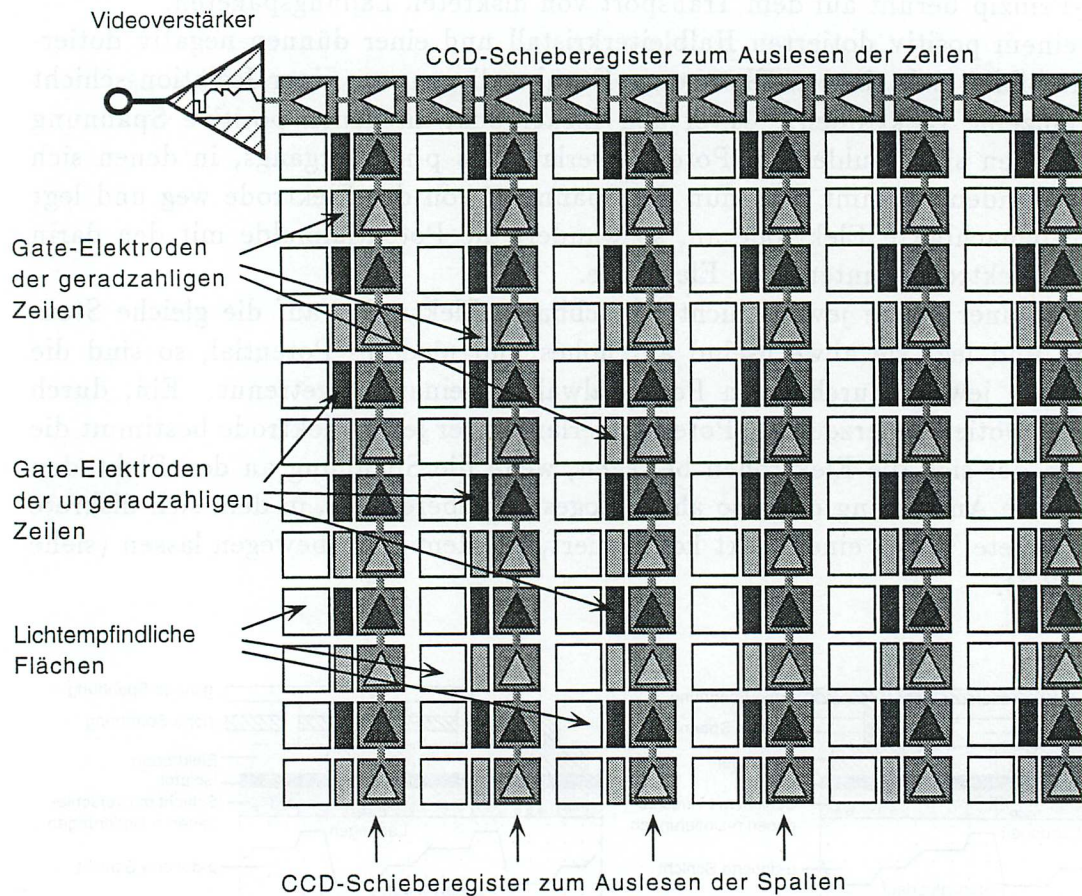


Abbildung 3.8: Skizze eines CCD-Kamera-Chips

Die in Europa gebräuchliche CCIR³ Videonorm fordert 50 Halbbilder bzw. 25 Vollbilder je Sekunde. Jedes Vollbild setzt sich aus 625 Zeilen zusammen, von denen jedoch die ersten und letzten jedes Halbbildes ohne Bildinformation sind. Daraus ergibt sich eine Zeilenfrequenz von 15625 Hz.

Tabelle 3.2 zeigt die technischen Daten der im Aufbau verwendeten Kamera.

3.3.3 Die Frame-Grabber-Karte

Zum Digitalisieren der Kamerabilder wurde die Frame-Grabber-Karte IPP von ELTEC Elektronik gewählt. Mit ihr läßt sich das BAS-Signal in 256 Graustufen je Bildpunkt

²Bild-Austast-Synchronisations-Signal

³Comit Consultative International des Radiocommunications

konvertieren. Sie verfügt über zwei 1 Megabyte Bildspeicher und einen dritten, entsprechend großen, als Overlayplane bezeichneten Speicherbereich. Er dient unter anderem als Maske zur Wahl des Bildausschnitts.

Betriebsspannung	12 V
Stromaufnahme	200 mA
Abmessung	46 mm × 70 mm × 27 mm
Ausgangssignal	CCIR-BAS-Signal
Ausgangspegel	1 V _{ss} /75Ω
Vertikalauflösung	575 Zeilen
Größe der aktiven Fläche	4,8 mm[h] × 3,6 mm[v]
Auflösung	512 [h] × 582 [v] Pixel
Lichtempfindlichkeit	0,2 Lux

Tabelle 3.2: Technische Daten der verwendeten Kamera [Con 94]

Auf die Horizontal- und Vertikalsynchronisation des Videosignals abgestimmt, werden die Zeilen in natürlicher Reihenfolge, von 0 beginnend, auf die Overlayplane abgebildet. Der Offset zwischen zwei Zeilenanfängen beträgt dabei unabhängig von ihrer Länge 1028 Byte. Der in der Overlayplane markierte Bereich wird dann im gleichen Format, beginnend mit Adresse 0, in einem der beiden Bildspeicher abgelegt. Die Zeilenauflösung entspricht daher direkt den Zeilen des Videosignals.

Pro Zeile werden 833 Bildpunkte in einen 8 Bit Wert umgewandelt. Dieser bestimmt über eine sogenannte Look-up-Table den zu speichernden Grauwert. Mit dieser Look-up-Table läßt sich die Intensitätsmessung linearisieren. Die Bildpunkte einer Zeile entsprechen nicht den horizontalen Pixeln der Kamera, sondern der Rate, mit der das analoge Zeilensignal abgetastet wird. Sie ist so gewählt, daß die Grauwerte im gespeicherten Bild quadratischen Pseudopixeln entsprechen.

Wenn nichts anderes angegeben wird, sind im folgenden mit Bildpunkt bzw. Pixel immer diese, von der Frame-Grabber-Karte erzeugten, Pseudopixel gemeint. Ebenso werden die mit der Kamera gemessenen Lichtintensitäten in einer Skala von 0 – 255 angegeben, deren Einheit als Digit bezeichnet wird.

3.3.4 Die Streuscheibe

An die Ausgangsfläche des Lichtmischers ist eine Streuscheibe angekoppelt, um die Lichtverteilung an der Ausgangsfläche des Lichtmischers sichtbar zu machen.

Dazu dient eine Opalglasscheibe mit 50 mm Durchmesser und 3 mm Dicke. Die Opalschichtdicke beträgt 0.4 mm [Spi 93]. Sie besitzt Volumencharakteristik, das heißt, das auftreffende Licht wird gleichmäßig in den gesamten Raum gestreut.

3.3.5 Das Objektiv

Das verwendete Objektiv besitzt eine Brennweite von 25 mm. Das Verhältnis von Brennweite zu Objektivöffnung (die Blendenzahl) läßt sich von 1,9 bis 22 einstellen. Dabei bewirkt eine große Blendenzahl ein dunkleres Bild mit größerer Tiefenschärfe.

Kleine Blendenzahl bewirkt ein helles Bild bei geringerer Tiefenschärfe. Das Objektiv besitzt zudem einen Mechanismus zum Einstellen der Bildschärfe. Er beruht auf der Variation des Abstands zwischen Linsenhauptebene und Bildebene durch Verschieben der Linse im Objektiv.

3.4 Die Datennahme

3.4.1 Das Programm „ccdtool“

Zur Bedienung der kompletten Apparatur diente das eigens dafür in C und 68020 Assembler geschriebene Programm „ccdtool“ (siehe Anhang B.1). Mit ihm lassen sich die Voreinstellungen von Kamera (z. B. Bildausschnitt) und Scantisch z. B. Voll-/Halbschrittbetrieb vornehmen.

Eine seiner Hauptaufgabe lag dabei im Aufnehmen mehrerer Einzelbilder und der Berechnung von Mittelwert und, wenn gewünscht Standardabweichung der einzelnen Pixel. Das gemittelte Bild, sowie das Bild der Standardabweichungen, kann dann sowohl auf dem Monitor angezeigt, als auch abgespeichert werden. Die Bilder wurden zur Weiterverarbeitung per FTP⁴ über das Datennetz auf den Hewlett-Packard Unix-Cluster des Instituts oder einen Apple Macintosh übertragen.

Darüber hinaus steuert es das Abscannen der Lichtmischer. Dabei kann die Eingangsfläche der Lichtmischer in X- und Y-Richtung in beliebigen Schritten abgefahren, und von jeder Position bis zu 255 Einzelaufnahmen gemittelt werden.

Um dieses Meßprogramm bei über 1200 Eingangspositionen in einer Nacht zu bewältigen, wurden die Programmteile zum Auslesen und Akkumulieren der Einzelbilder geschwindigkeitsoptimiert in Assembler geschrieben.

Die anfallende Datenmenge eines Scandurchgangs (bis zu 170 Mega-Byte) wurde dabei vom Programm in eine sogenannte Pipe geschrieben. Dies ist ein als FIFO⁵ bezeichneter Speicherbereich, der zum Datentransport zwischen Programmen dient.

Die Daten werden von einem Programm in die Pipe geschrieben und von einem anderen Programm aus dieser ausgelesen. Dadurch verbleiben die Daten nur kurzzeitig im Speicher, so daß ein relativ kleiner Speicherbereich als Datenpuffer zwischen den Programmen genügt. Die Scandaten wurden, ebenfalls per FTP, direkt aus der Pipe auf eine 2-Giga-Byte-Festplatte des Unix-Cluster übertragen.

3.4.2 Datenkonvertierung zur Auswertung

Zur Analyse der Daten auf dem UNIX-Cluster ist das Programmpaket PAW⁶ vorgesehen. Dazu müssen sie jedoch zuerst noch unter Verwendung des FORTRAN Programmpakets HBOOK in PAW-NTUPEL umgewandelt werden. Um nun die richtige Interpretation der, vom C-Programm „ccdtool“ binär gespeicherten, Bilddaten sicher zu stellen, wurden sie von speziellen C-Programmen gelesen und in ASCII-Format umgewandelt, das den dreifachen Speicherplatzbedarf hätte.

Sie gelangen jedoch per Pipe direkt zu einem Fortran Programm, das die Daten dann

⁴File-Transfer-Programm

⁵first in first out

⁶Physik-Analysis-Workstation

als PAW-NTUPEL speichert. Dazu wurden für verschiedene Datenformate folgende Programmpaare entwickelt (siehe Anhang B.2):

- Zur Umwandlung einzelner Bilder in ein NTUPEL: readpic — bookpic
- Zur Umwandlung einzelner Bilder mit dem Bild der Standartabweichungen in ein NTUPEL: read2pic — book2pic
- Zur Umwandlung eines Scandurchgangs in ein Ntupel: readscan— bookscan
- Zur Umwandlung eines Einzelbildes in ein Photonenfile für das Simulationsprogramm: readpic — photgen

3.4.3 Bildverarbeitung mit Apple-Macintosh

Die auf einen Apple-Macintosh transferierten Bilder lassen sich dort mit dem Bildverarbeitungsprogramm Adobe-Photoshop manipulieren.

Sie lassen sich unter Angabe von Breite und Höhe (in Pixel), der Pixelgröße (1 Byte) und der Größe der Bildheaders (128 Byte) über das Bildformat „RAW“ einlesen. Daraufhin kann man die Bilder sowohl bearbeiten, als auch in gängige Bildformate wie „EPS“ oder „Tiff“ umwandeln.

Auf diese Weise wurden z. B. die Aufnahmen dieser Diplomarbeit erstellt.

Die FAW 2 (FAB 2) gibt an, dass die vertikale Ausrichtung der Bilder...

Die FAW 3 (FAB 3) gibt an, dass die horizontale Ausrichtung der Bilder...

Die FAW 4 (FAB 4) gibt an, dass die vertikale Ausrichtung der Bilder...

Die FAW 5 (FAB 5) gibt an, dass die horizontale Ausrichtung der Bilder...

Die FAW 6 (FAB 6) gibt an, dass die vertikale Ausrichtung der Bilder...

3.1.3 Bildverarbeitung mit Apple-Macintosh

Die Apple-Macintosh-Systeme sind für die Bildverarbeitung...

Die Apple-Macintosh-Systeme sind für die Bildverarbeitung...

Die Apple-Macintosh-Systeme sind für die Bildverarbeitung...

Die Apple-Macintosh-Systeme sind für die Bildverarbeitung...

Kapitel 4

Die Eichung der Meßapparat

4.1 Der Scantisch

Da die exakte Bestimmung von Schrittmotorresonanzen den Rahmen einer Diplomarbeit übersteigt, wurde versucht, durch Variieren von Strom und Schrittfrequenz, geeignete Betriebsparameter zu finden. Dazu wurde ein Adapter gebaut, der den eingeschränkten Betrieb des Moduls außerhalb des Rechners ermöglicht. So konnten Schrittfolgen und Beschleunigungen über Potentiometer verändert, und das Verhalten der Motoren dabei beobachtet werden. Dies führte zur Wahl der Parameter in Tabelle 4.1.

maximale Verfahrensgeschwindigkeit	800 Schritte / Sekunde
Start-/ Stoppgeschwindigkeit	200 Schritte / Sekunde
Initialisierungsgeschwindigkeit	150 Schritte / Sekunde
Beschleunigungszeit	1 Sekunde
Bremsweg	768 Schritte
Strom	1,5 Ampère

Tabelle 4.1: Die Betriebsparameter der Schrittmotorsteuerung

Um die Eignung der Betriebsparameter zu prüfen, wurde ein weiterer Überfahrschalter, in mittlerer Position, an die Verfahrensschiene montiert. Auf sein Signal hin, wurde der Zählerstand des Steuermoduls ausgelesen und damit die aktuelle Position des Wagens bestimmt. Die Wagen wurden nun 250 mal um 25 cm hin- und hergefahren ohne die Position neu zu initialisieren (Abbildung 4.2 oben). Es zeigt sich sowohl die mangelnde Schaltgenauigkeit des verwendeten Überfahrschalters als auch das durch Schrittfehler bedingte Schwanken der Referenzposition.

Abbildung 4.2 unten zeigt ebenfalls die Position des Referenzschalters bei 250-fachem hin- und herfahren des Motors um 25 cm. Allerdings wurde diesmal die Position vor jedem Start neu initialisiert. Dadurch überlagerten sich die Schaltgenauigkeiten des Referenzschalters mit denen des baugleichen, zur Initialisierung dienenden Endschalters. Ein eventueller Schrittverlust ist nicht erkennbar.

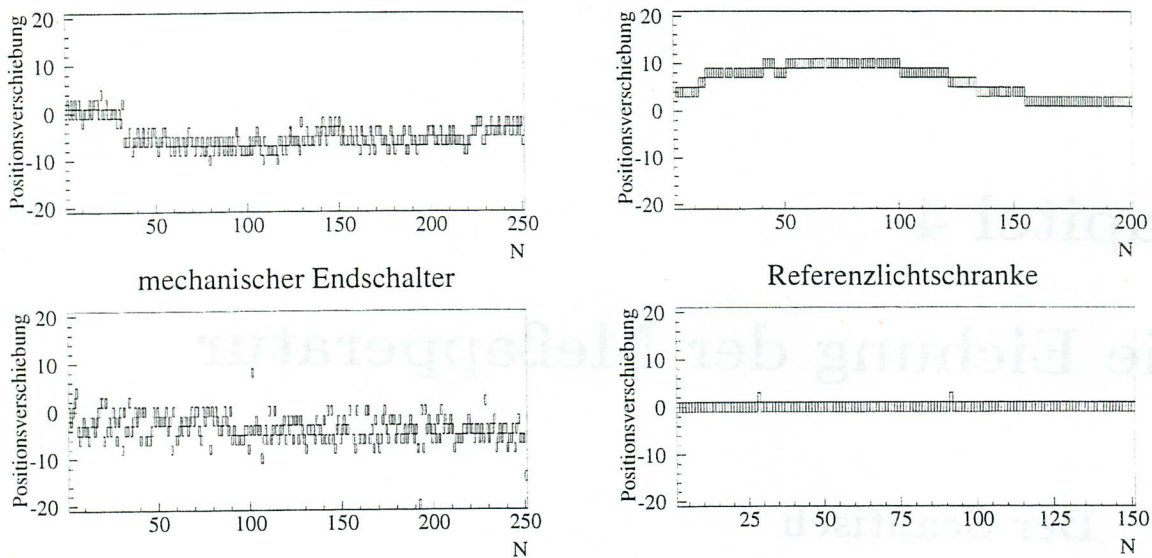


Abbildung 4.1: Die Wiederholgenauigkeit des Scantisches.

Links oben: Die Position des Überfahrerschalters als Referenzpunkt beim Verfahren ohne Neuinitialisierung

Links unten: Die Position des Überfahrerschalters als Referenzpunkt beim Verfahren mit Neuinitialisierung

Rechts oben: Die Position der Lichtschranke als Referenzpunkt beim Verfahren ohne Neuinitialisierung

Rechts unten: Die Position der Lichtschranke als Referenzpunkt beim Verfahren mit Neuinitialisierung

Um die Schaltpunkte von Überfahrerschalter und Referenzschalter auf den Schritt exakt zu bekommen, wurden sie pro Motor mit einer Gabellichtschranke gekoppelt (Abbildung 4.2). Dazu wurde am Handrad der Gewindespindel ein Draht mit $0,5\text{ mm}$ Durchmesser befestigt. Bei jeder Umdrehung der Gewindespindel (entspricht einem Fahrweg des Wagens von 4 mm) durchläuft dieser Draht einmal die Gabellichtschranke. Bei einem Umfang des Handrades von ca. 165 mm wird die Lichtschranke also bei einem, exakt definierten Schritt unterbrochen. Erreicht der Wagen nun einen Überfahrerschalter, aktiviert dieser die Lichtschranke, welche dann bei Unterbrechung durch den Draht das Signal an die Steuerung abgibt. Mit dieser Vorrichtung wurde der Wagen 200 bzw. 150 mal um 25 cm vor- und zurück gefahren. Dabei wurde in Abbildung 4.1 oben die Position nur zu Beginn, in Abbildung 4.1 bei jedem Verfahren neu initialisiert.

Das obere Bild zeigt weiterhin Positionsschwankungen durch Schrittverluste. Im unteren Bild sind jedoch von 150 Positionen nur 2 um einen Schritt verfehlt. Beide Bilder demonstrieren die Tauglichkeit der Gabellichtschranke zum schrittgenauen Schalten. Um ein Aufsummieren, der nicht auszuschaltenden Schrittverluste zu vermeiden, wurde beim Abscannen der Lichtmischer jedesmal zwischen zwei Positionen neu initialisiert. Bei maximalen Fahrwegen von 35 mm pro Achse, während einer Meßreihe, kann davon ausgegangen werden, daß die Positionen genau angefahren werden.

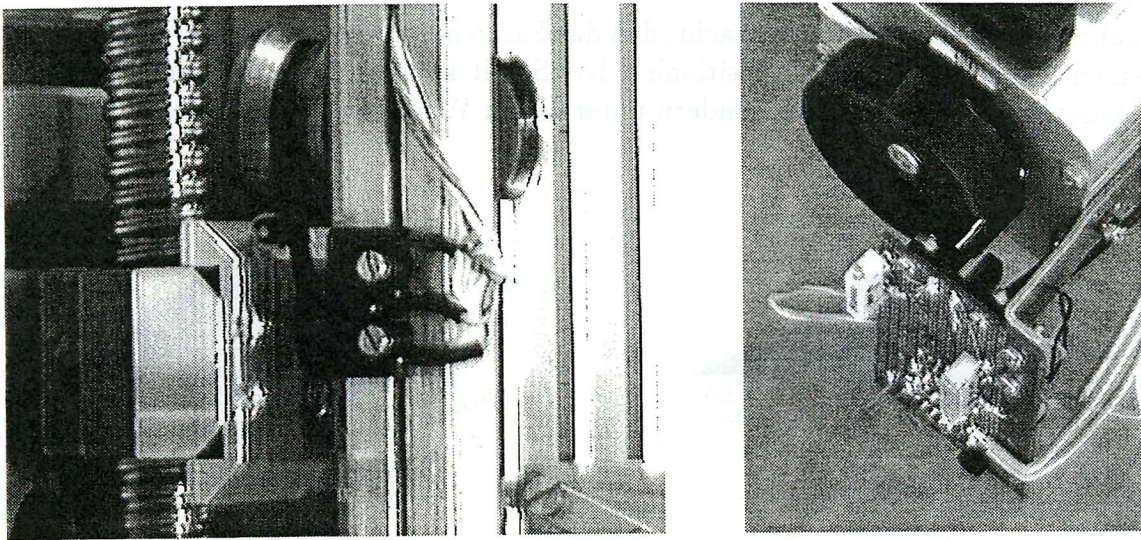


Abbildung 4.2: Das Referenzschaltersystem.

Links: Die versetzbar angebrachten Überfahrshalter

Rechts: Die Gabellichtschranke zur exakten definition des Nullpunkts

4.2 Die Optik

4.2.1 Die Lichtquelle

Zum Vergleich der Meßwerte mit der Theorie bzw. der Simulation ist die Kenntnis der Winkelverteilung, des aus der Faser austretenden Lichts wichtig.

Dazu wurde der direkt auf die Streuscheibe fallende Lichtkegel der Faser mit der Kamera aufgenommen, und der Abstand zwischen Faser und Streuscheibe gemessen. Bei einer Bildgröße auf der Streuscheibe von $22,4 \text{ mm} \times 22,4 \text{ mm}$ und einem typischen Abstand von $15 \text{ mm} - 20 \text{ mm}$ konnte der Faserdurchmesser von maximal 1 mm vernachlässigt werden.

Die meisten Messungen in dieser Arbeit wurde mit den Lichtquellen 1 und 2 von Abbildung 4.3 gemacht. Zum Vergleich ist in dieser Abbildung auch die Winkelverteilung der mit Szintillationslicht gespeisten Faser gezeigt.

Der kleine in der Mitte sitzende Peak bei den roten Lichtquellen 1 und 2, erwies sich als Abbildung des Faserendes, durch Licht, welches die Streuscheibe ungestreut passiert. Seine Position auf dem Abbild des Lichtkegels bildete das Maß zum Ausrichten der Lichtleitfaser. Der fehlende Peak auf der Winkelverteilung des grünen Szintillationslichts weist auf eine Wellenlängenabhängigkeit des Streuvermögens der Opalglasscheibe. Bei den Aufnahmen der Lichtmischerendflächen war aber ein entsprechender Peak nicht mehr zu beobachten.

Leider erwies sich die Winkelverteilung in den Fasern nur bedingt als reproduzierbar. Selbst wenn eine LED-Faser-Kombination getrennt, die Trennstelle aufs neue poliert und wieder verklebt wurde zeigte die nacher gemessene Winkelverteilung oft deutliche Abweichungen. Abbildung 4.3 zeigt zusätzlich zwei Beispiele von Fasern mit schlechter Winkelverteilung. Der „Krater“ in Bild rechts unten wurde mehrfach beobachtet und

wird wahrscheinlich dadurch verursacht, daß das Faserende nicht direkt über dem relativ kleinen leuchtenden Kristall positioniert ist. Somit koppelt das Licht vom Kristall nicht symmetrisch zur Faserachse, sondern unter einem Winkel in die Faser ein.

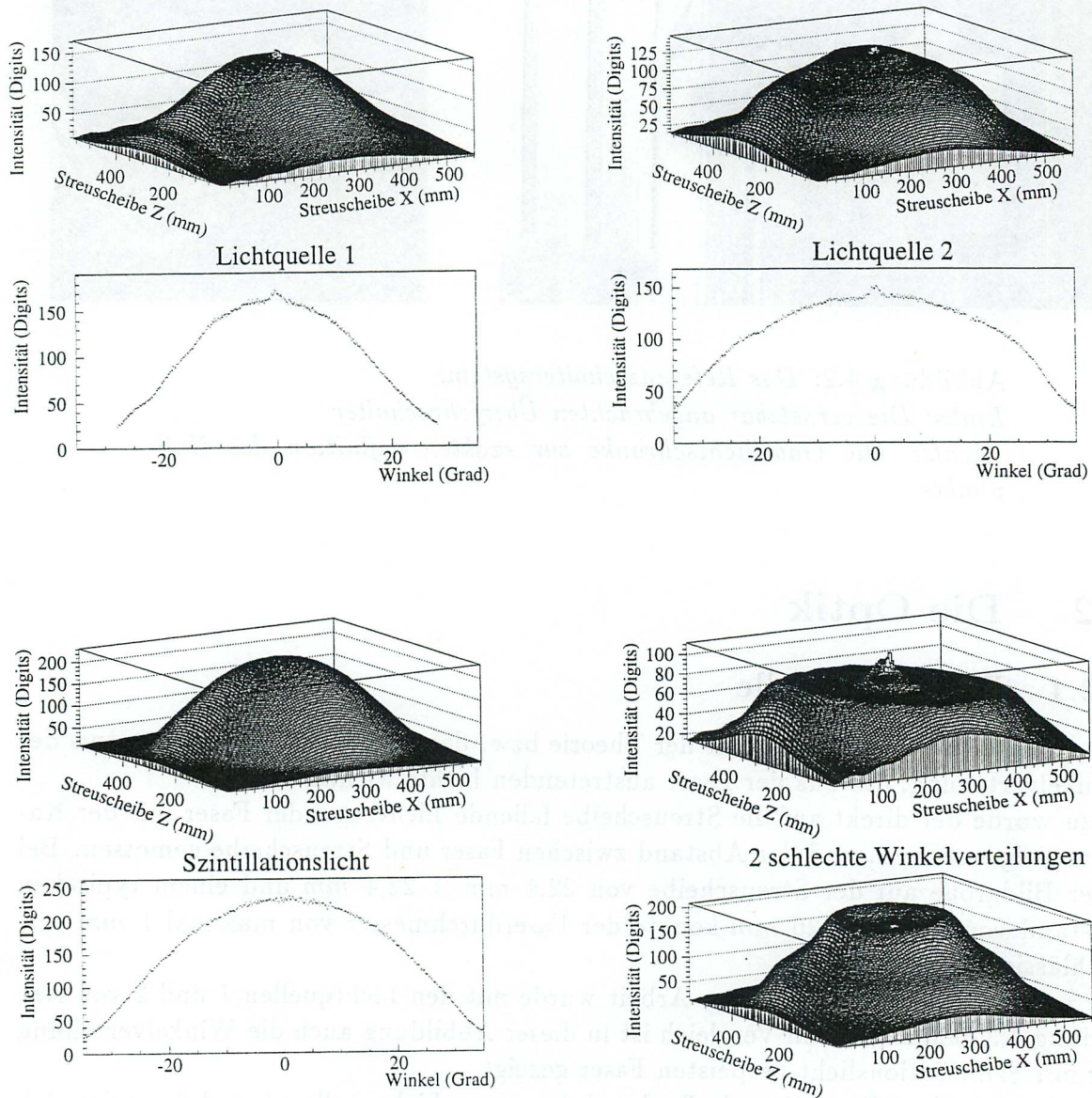


Abbildung 4.3: Winkelverteilung von Licht das aus den Lichtleitfasern austritt.

4.2.2 Das Rauschen

Wie jedes elektrische Signal ist auch das Videosignal der Kamera mit Rauschen behaftet. Dies führt zu Meßunsicherheiten bei der Bestimmung von Grauwerten durch den ADC der Frame-Grabber-Karte. Um die Größe dieser Unsicherheit zu bestimmen, wurden 250 Aufnahmen eines Bildes gemacht, in dem alle Grauwerte von 0 - 255 in etwa gleicher Häufigkeit vorkommen. Von diesen 250 Bildern wurden vom ADC-Wert

jedes Bildpunktes Mittelwert und Standardabweichung berechnet und gegeneinander aufgetragen (Abb.4.4). Die Standardabweichung bewegt sich in einem Bereich zwischen 2 und 4, liegt jedoch immer unter 7.

Nach den Regeln der Statistik verhält sich nun die Unsicherheit des Mittelwertes bei N Messungen wie $1/\sqrt{N}$. Für Bilder, die aus 50 Einzelmessungen gemittelt sind, erreicht die Intensitätsmessung eine Meßunsicherheit kleiner als 1 Digit. Die Bilder der Arbeit wurden aus je 100 Einzelbilder gemittelt.

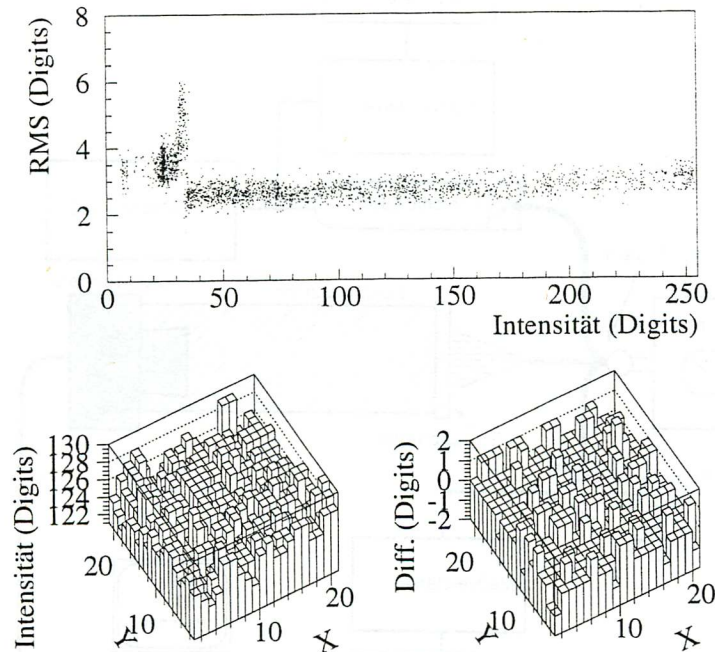


Abbildung 4.4:

Oben: Das Rauschen in Abhängigkeit von der Lichtintensität.

Unten links: Die Pixel zu Pixel Variation in einem Bildausschnitt.

Unten rechts: Residuen der Pixel von zwei Bilder mit je 100 Einzelaufnahmen.

Abbildung 4.4, die die Intensität der einzelnen Bildpunkte einer Messung aus 100 Einzelbildern zeigt, wirkt noch immer verrauscht. Diese Intensitätsschwankung von Bildpunkt zu Bildpunkt nennt man die „Pixel-zu-Pixel-Variation“ der Kamera. Sie entsteht dadurch, daß nicht jedes Sensorelement des CCD-Chips die gleiche Empfindlichkeit besitzt. Man erhält eine Standardabweichung von 1,4 Digits.

Subtrahiert man zwei Messungen aus 100 Einzelaufnahmen desselben Objekts voneinander Abbildung 4.4, hebt sich die „Pixel-zu-Pixel-Variation“ heraus. Die verbleibenden Differenzen entsprechen in ihrer Häufigkeit Meßwertschwankungen im ein und zwei Sigma Niveau.

Da bei der Auswertung bis zu 100 Bildpunkte zusammengefaßt werden, mittelt sich die „Pixel-zu-Pixel-Variation“ ebenfalls aus.

4.2.3 Die Linearität der Kamera

Um aus den Messungen quantitative Aussagen machen zu können, ist ein lineares Verhältnis zwischen Lichtintensität und Meßwert wichtig. Die automatische Blendenregelung der verwendeten Kamera beruht darauf, daß die Signalendstufe ihr Verstärkungsverhältnis bei starkem Lichteinfall senkt. Dieser Effekt muß gemessen und dann über die Look-up-table der Frame-grabber-Karte korrigiert werden. Zur Vermessung der Kameralinearität wurde der Aufbau nach Abbildung 4.5 verwendet.

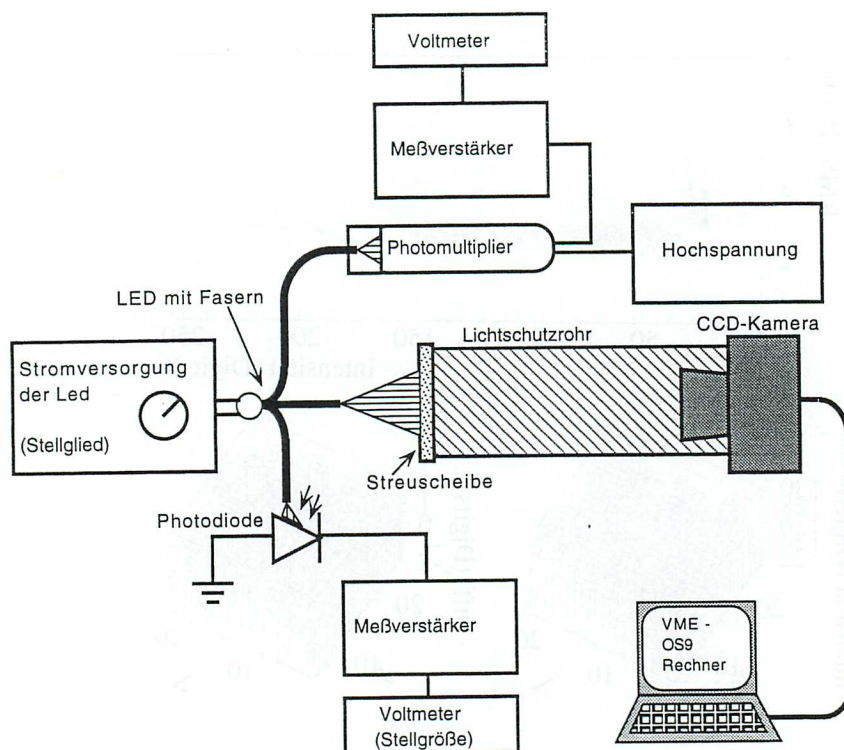


Abbildung 4.5: Meßaufbau zur Bestimmung der Helligkeitseichkurve der Kamera.

An eine LED wurden mehrere Lichtleitfasern angekoppelt und damit die Streuscheibe ausgeleuchtet. Zwei Fasern dienten als Intensitätsreferenz. Die Lichtintensität der einen wurde mit einem Photomultiplier bestimmt, die Intensität der anderen mit einer Photodiode in Sperrrichtung. Zur Messung der sehr kleinen Ströme von Photomultiplier und Photodiode wurden zwei speziell abgestimmte Meßverstärker aufgebaut.

Beide Referenzsysteme wurden zunächst als linear im Rahmen der Meßgenauigkeit angenommen, was durch den Vergleich miteinander bestätigt werden sollte. Als Stellgröße wurde der Strom durch die LED dergestalt variiert, daß der Sperrstrom der Photodiode in 136 gleichen Schritten anstieg, um so die Lichtintensität möglichst linear zu steigern. Als Intensitätswert der Kamera wurde der Mittelwert aus 100 Einzelbildern und 256 Pixeln gebildet.

Abbildung 4.6 oben, zeigt die Residuen zwischen den auf eins normierten Meßwerten von Photomultiplier und Photodiode. Der Erwartung entsprechend zeigen sie Abweichungen von unter einem Prozent und eignen sich damit als lineare Referenz. Gegen die so erhaltene, auf eins normierte Lichtintensität wurde der Grauwert der CCD-Kamera

aufgetragen und verschiedene Polynome durch den Nullpunkt angefitet (Abbildung 4.6 mitte). Bei einem Polynom 5. Grades erhält man Abweichungen zwischen Messung und Fit-Polynom von maximal einem Digit (Abbildung 4.6 unten). Von diesem Polynom wurden numerisch, die 256 Korrekturwerte für die Input-Look-up-Table berechnet.

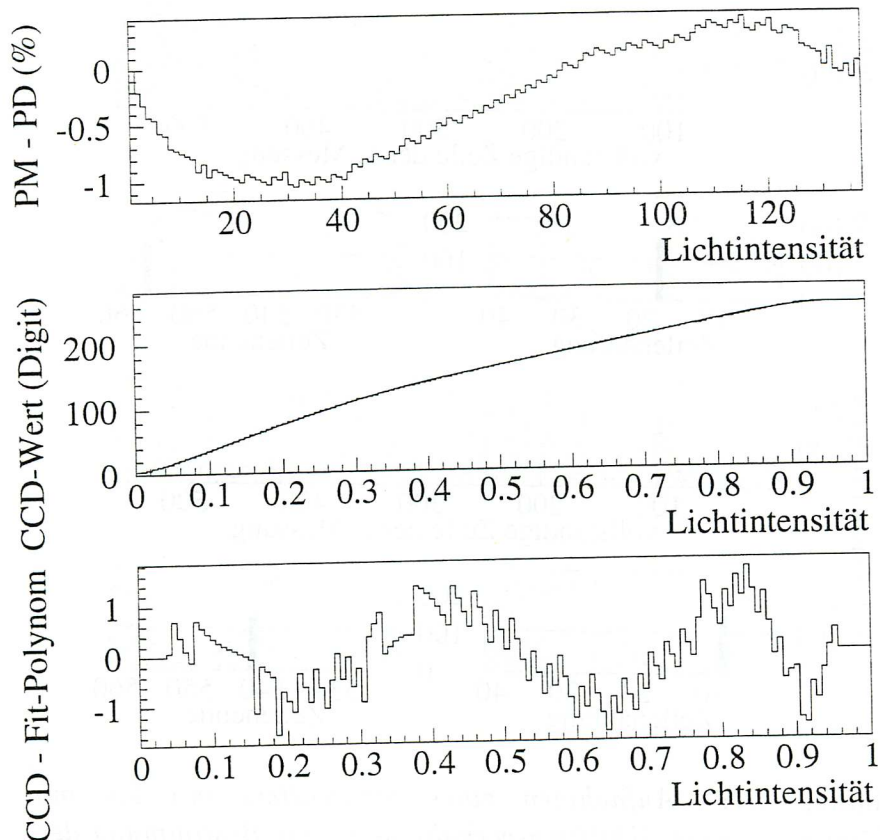


Abbildung 4.6:

Oben: Abweichung zwischen den normierten Intensitäten von Photomultiplier und Photodiode.

Mitte: Die Konvertierungskurve des ADC mit Fitpolynom.

Unten: Abweichung zwischen Fitpolynom und ADC-Werten.

4.2.4 Das Abbildungsverhältnis

Um Flächen bis $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ aufnehmen zu können, wurde ein Abbildungsverhältnis von $40 \mu\text{m}/\text{Pixel}$ angestrebt. Nach Kapitel 2.5.3 ist das Abbildungsverhältnis bestimmt durch die Brennweite des Objektivs und dem Abstand zwischen Gegenstandsebene und Bildebene. Letztere Beziehung wurde zum Einstellen des Vergrößerungsverhältnisses genutzt, da sie unabhängig ist von der absoluten Lage der Linsenhauptebene. Allerdings mußte zuerst die absolute Größe der digitalisierten Pixel bestimmt werden. Dazu wurde das relative Abbildungsverhältnis $V' = cV = ca'/A$ definiert, mit c =Größe eines Pixels und a' Anzahl der Pixel.

Mit einem ausreichend exakten Photoplotter¹ wurde ein Gitter mit 0,5 mm breiten schwarzen Strichen in 1 mm Abstand hergestellt. Dies diente als Maßstab in der Gegenstandsebene. Über zwei Bilder bei bekanntem Abstand zwischen Streuscheibe und CCD-Chip, wurde nun zuerst die absolute Größe der digitalisierten Bildpunkte c zu $6,17 \mu\text{m}/\text{Pixel}$ bestimmt (Abbildung 4.7 und Tabelle 4.2).

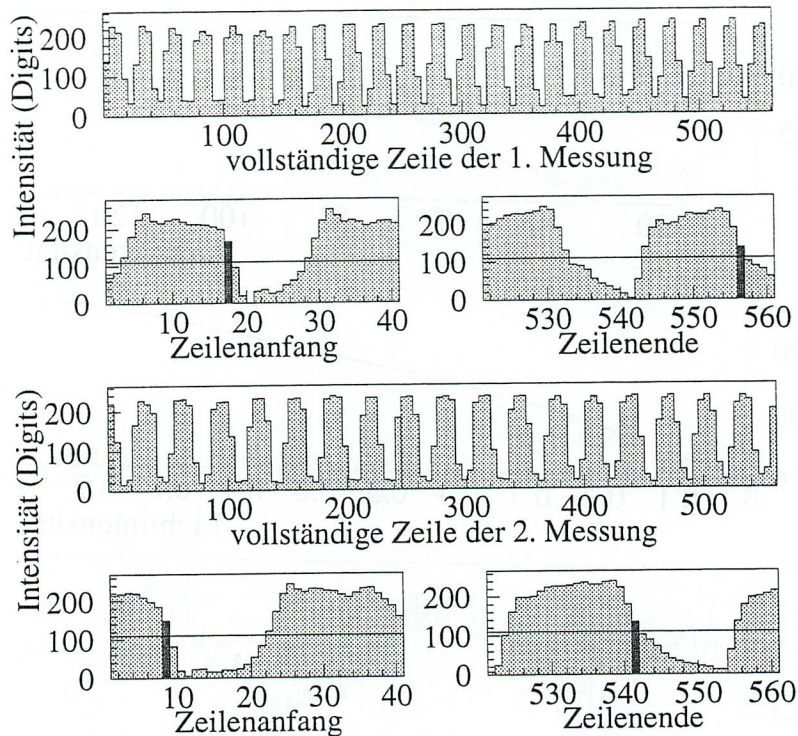


Abbildung 4.7: Aufnahmen eines Strichgitters mit 0,5 mm Auflösung mit zwei Abbildungsverhältnissen, zur Bestimmung der Pixelgröße

	Abstand	V	A	a'	V'	$c = V'/V$
Messung 1	219 mm	6,61	22 mm	539 Pixel	41 $\mu\text{m}/\text{Pixel}$	0,006175 $\mu\text{m}/\text{Pixel}$
Messung 2	184 mm	5,17	17 mm	533 Pixel	32 $\mu\text{m}/\text{Pixel}$	0,006169 $\mu\text{m}/\text{Pixel}$
				Ergebnis		0,00617

Tabelle 4.2: Messung der absoluten Pixelgröße.

Mit den Werten von Tabelle 4.2 ergibt sich für den gewünschten Abbildungsmaßstab von 40 ein Abstand von Streuscheibe zu Chip von 215,9 mm. Dieser wurde eingestellt und die Auflösung in vertikaler und horizontaler Richtung gemessen (Abbildung 4.8). Dabei zeigte sich, daß die, von der Frame-Grabber-Karte erzeugten Bildpunkte im

¹Positionsgenauigkeit laut Datenblatt $1/1000\text{inch} = 25,4\mu\text{m}$

Rahmen der Meßgenauigkeit quadratisch sind. Bei genauer Betrachtung der Schwarz-Weiß-Flanken bemerkt man ein Abnehmen der Bildschärfe bei wachsendem Abstand von der optischen Achse. Ebenso stellte sich heraus, daß das Objektiv relativ zur aktiven Fläche des CCD-Chips nach oben versetzt ist. Dies macht sich an der Flankensteilheit der Abbildung des vertikalen Gitters deutlich bemerkbar, hat aber aufgrund der im nächsten Kapitel besprochenen Ortsauflösung keinen wesentlichen Einfluß auf die Messungen.

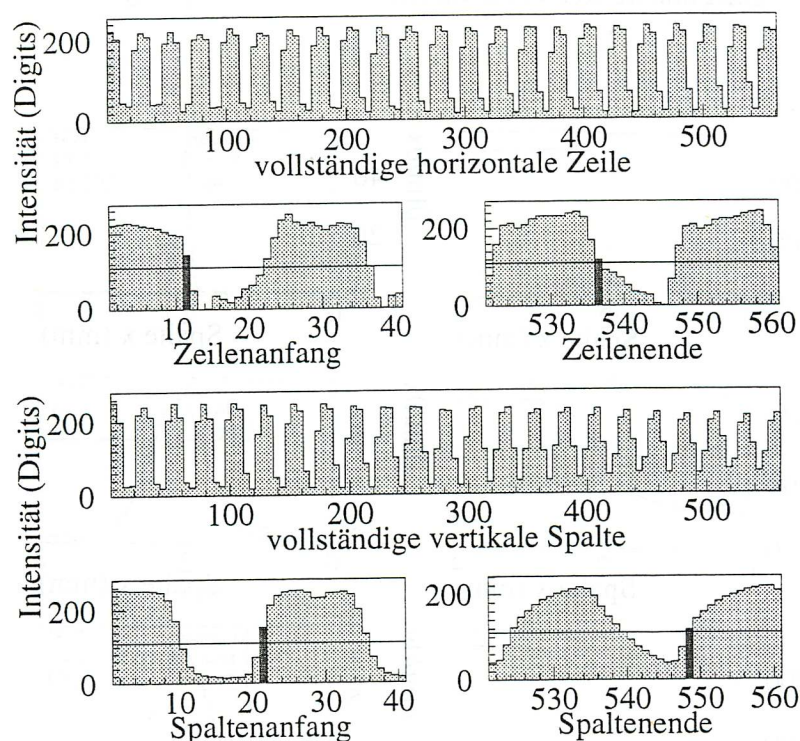


Abbildung 4.8: Messung der horizontalen und vertikalen Abblendeungsmaßstabes.

4.2.5 Die Ortsauflösung

Die Ortsauflösung der Meßapparatur ist limitiert durch die „Aufweichung“ einer Struktur durch die Streuscheibe. Die Abschätzung des Effekts erfolgte durch die Aufnahme eines scharfen Schwarz-Weiß-Übergangs

Per Fotokopie wurde eine schwarze Fläche auf einer durchsichtigen Folie aufgebracht. Die Prüfung ihrer Qualität erfolgte durch eine Aufnahme der Kante ohne Streuscheibe (Abbildung 4.9 oben). Daraufhin wurde ihre Verbreiterung durch die Streuscheibe in horizontaler und vertikaler Richtung gemessen (Abbildung 4.9 Mitte und unten).

Nimmt man die gaußförmige Verschmierung eines Punktes durch die Streuscheibe an, so ergibt die Aufnahme eines idealen Schwarz-Weiß-Übergangs eine gaußverbreiterte Stufenfunktion.

$$f(x)_{\text{Schwarz-Weiß-Kante}} = P_1 + P_2 \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \int_0^x e^{-\frac{(P_3-x')^2}{\sqrt{2}P_4}} dx' \right)$$

$P_1 = Y\text{-Offset}$
 $P_2 = \text{Amplitude}$
 $P_3 = X\text{-Offset}$
 $P_4 = \text{Halbwertsbreite}$

Die Auflösung entspricht dabei der Halbwertsbreite der Gaußkurve, die man durch differenzieren der Stufenfunktion wiedererhält. Sie sind in Abbildung 4.9 rechts neben den zugehörigen Stufenfunktionen zu sehen. Erwartungsgemäß findet man in vertikaler und horizontaler Richtung die gleiche Auflösung von $\leq 0,4 \text{ mm}$. Entsprechend wurde das Binnig der Ausgangsfläche der Lichtmischer bei der Analyse gewählt.

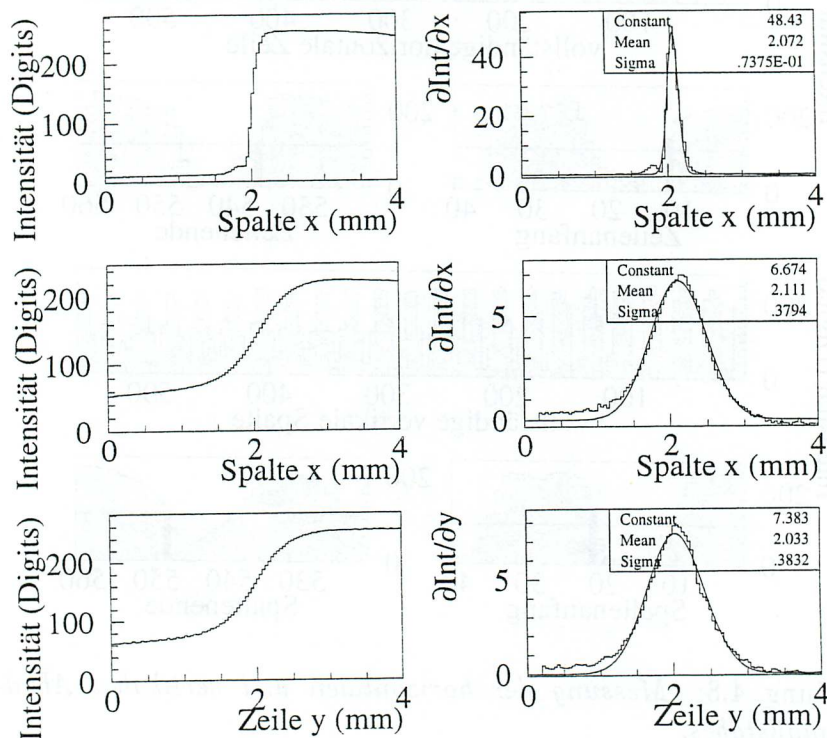


Abbildung 4.9: Aufnahme einer Schwarz-Weiß-Kante mit und ohne Streuscheibe.

Kapitel 5

Meßergebnisse

5.1 Einführung

Ein idealer Lichtmischer soll Licht von seiner Eingangsfläche dergestalt auf seine Ausgangsfläche leiten, daß ein dort angekoppelter Photomultiplier für alle Positionen der Eingangsfläche ein Signal liefert, das der Lichtmenge proportional ist. Wie exakt diese Forderung vom realen Lichtmischer erfüllt wird, hängt von seinen folgenden beiden, prinzipiell voneinander unabhängigen, Eigenschaften ab:

1. Die Fähigkeit, von jedem Punkt seiner Eingangsfläche die gleiche (möglichst große) Lichtmenge zur Ausgangsfläche weiterzuleiten.
2. Die Fähigkeit, die Ausgangsfläche so gleichmäßig auszuleuchten, daß die Inhomogenität der Photokathode keinen Einfluß auf das Ausgangssignal hat.

Die Inhomogenität der Photokathode, die Inhomogenität der Ausleuchtung der Ausgangsfläche und die Schwankungen der absoluten Lichtmenge, die zur Ausgangsfläche weitergeleitet wird, überlagern sich zur Gesamtunsicherheit des Photomultipliersignals. In der Analyse werden diese Eigenschaften zunächst getrennt untersucht und dann der Gesamteffekt abgeschätzt.

5.2 Pyramidenförmige Lichtmischer

5.2.1 Die Geometrie der vermessenen Lichtmischer

Eine Möglichkeit Kegelstümpfe zu klassifizieren, so daß kongruente Formen wertegleich sind, bilden folgende zwei Parameter:

Der Öffnungswinkel δ : Er ist ein Maß dafür wie oft ein Lichtstrahl im Lichtmischer totalreflektiert wird. Mit größer werdendem δ sinkt die Anzahl möglicher Totalreflektionen.

Länge des Lichtmischers L zur Seitenlänge der Ausgangsfläche A : Umso größer dieses Verhältnis L/A ist, desto mehr Reflektionen werden den Lichtkegel auf die Ausgangsfläche falten.

Um nun die Meßergebnisse bei gleicher Lichtquelle direkt vergleichen zu können, wurde die Länge aller Lichtmischer und die Größe ihres Ausgangsfenster gleich gewählt (siehe Kapitel 2.4). Der Öffnungswinkel wurde über die Größe des Eingangsfensters variiert. Vier Lichtmischer, entsprechend Tabelle 5.1, wurden zur Untersuchung von der mechanischen Werkstatt des Instituts hergestellt.

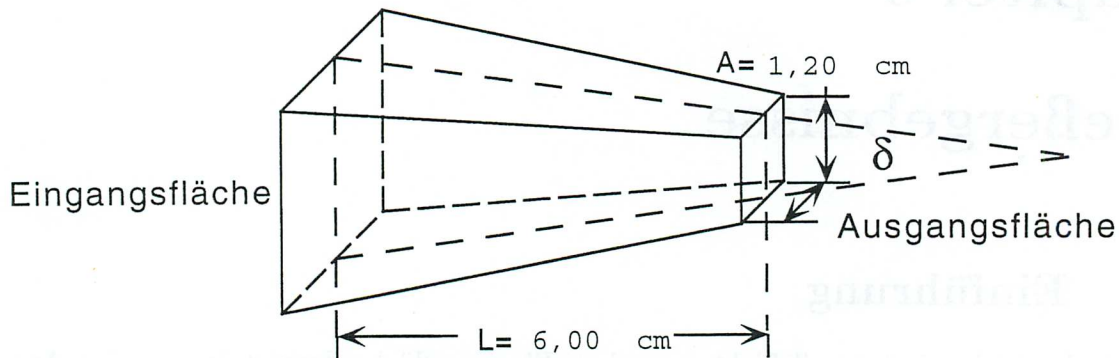


Abbildung 5.1: Maße und Parametrisierung von Lichtmischern in Form von Kegelstümpfen mit quadratischer Grundfläche.

Nr.	Eingangsfläche	Ausgangsfläche	Länge	L/A	δ
LM1	12mm × 12mm	12mm × 12mm	60mm	5	0°
LM2	20mm × 20mm	12mm × 12mm	60mm	5	7,6°
LM3	28mm × 28mm	12mm × 12mm	60mm	5	15,2°
LM4	36mm × 36mm	12mm × 12mm	60mm	5	22,6°

Tabelle 5.1: Die Maße der untersuchten Lichtmischer.

5.2.2 Die Lichtverteilung an der Ausgangsfläche

Die Abbildung 5.2 zeigt typische Lichtverteilungen an der Ausgangsfläche der Lichtmischer. Den beherrschenden Effekt bilden die Schatten, die sich von jedem Eck der Ausgangsfläche zu einem gemeinsamen Punkt erstrecken. Dabei ist die Position des Kreuzungspunktes der vier Schatten abhängig von der Position der Lichtquelle an der Eingangsfläche. Der Intensitätseinbruch im Schatten beläuft sich auf 10 - 15 %, im Kreuzungspunkt auf über 30 %.

Die Entstehung der Schatten läßt sich am einfachsten an Lichtmischer 1 erklären. Betrachtet man den Weg eines Lichtstrahls von der Eingangsfläche zur Ausgangsfläche, so trifft er entweder direkt auf die Ausgangsfläche oder wird zuvor ein- oder mehrmals an den Seitenflächen reflektiert. Entsprechend der Konstruktionshilfe aus Kapitel 2.5.2 kann man nun den Lichtstrahl geradlinig verlängern und den Lichtmischer an den Seitenflächen spiegeln. Der Lichtkegel liegt dann ganz in dem durch mehrfaches Spiegeln entstandenen Volumen. Faltet man die dadurch entstandenen Hilfsausgangsflächen auf die Originalfläche zurück, so ergibt die Überlagerung der Intensitätsverteilung der einzelnen Hilfsflächen die am Lichtmischerausgang beobachtete Intensitätsverteilung.

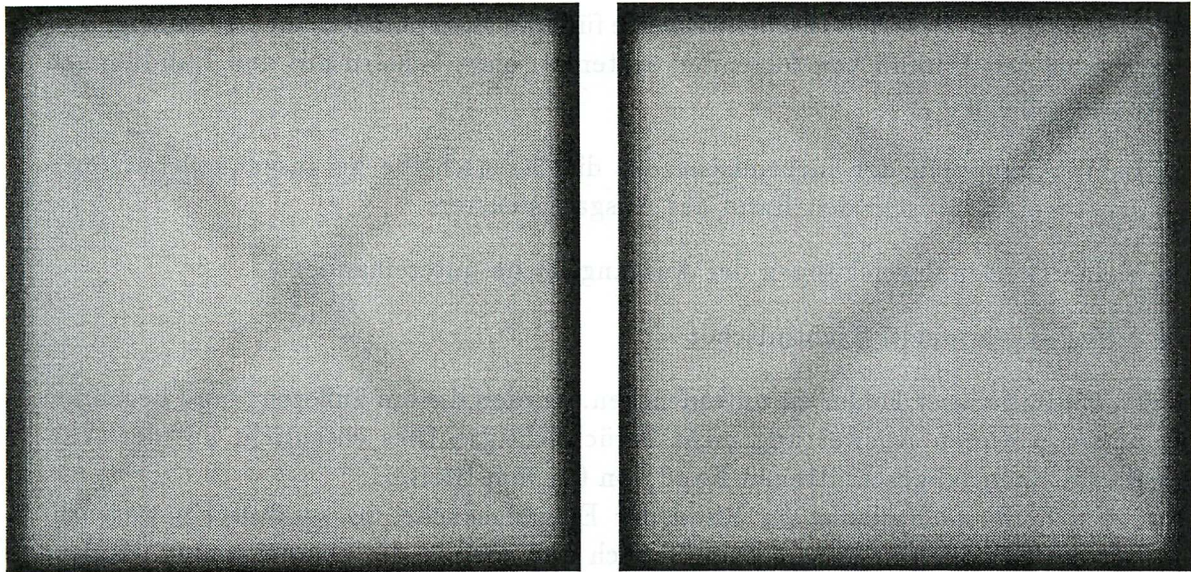


Abbildung 5.2: Das Bild an der Ausgangsfläche eines Lichtmischers. Die von den Kanten verursachten Schatten sind deutlich zu sehen.

*Links: Die Lichtquelle befindet sich in der Mitte der Eingangsfläche
Rechts: Die Lichtquelle ist etwas an den rechten, oberen Rand herangerückt*

Der gesamte vom Lichtkegel beleuchtete Kreis läßt sich jedoch nur bei perfekten Kanten von 90° in der beschriebenen Weise auslegen. Beim realen Lichtmischer sind die Kanten jedoch abgerundet, so daß Lichtstrahlen, die über eine Ecke die nächste Fläche erreichen würden, im Konstruktionsbild nicht mehr geradlinig verlaufen. Dies bedeutet, daß die Kanten einen Schatten auf die nächste Fläche werfen. Beim Zurückfalten auf die Originalfläche liegen diese Schatten in der Richtung der Position der Lichtquelle und verbreitern sich mit der Entfernung vom Eck. Diese Verbreiterung der Schatten zeigt sich auch in den Aufnahmen deutlich.

Um diesen Effekt weiter zu untersuchen, wurden Lichtmischer 2 zwei weitere Exemplare, gefertigt. Bei einem der beiden wurde besonderer Augenmerk auf scharfe Kanten gelegt, dem anderen beim polieren der Oberfläche die Kanten abgerundet. Obwohl die unterschiedliche Güte der Kanten mit bloßem Auge zu erkennen war, zeigten sich weder verbreiterte Schatten noch sonstige Effekte. Wahrscheinlich hätte der Kantenradius der drei Lichtmischer noch deutlichere Unterschiede aufweisen müssen. Von Seite der Massenfertigung, wie im Falle des SPACAL, bedeutet dieses Ergebnis, daß es sich nicht lohnt, die Qualität der Kanten mit großem Aufwand zu verbessern.

5.2.3 Die Lichtmenge am Ausgangsfenster

Die Eingangsfläche der Lichtmischer wurde in 1 mm Schritten von einer Faser beleuchtet. Für jede Faserposition wurden von der $12\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ (entspricht 300×300 Pixel) großen Ausgangsfläche 100 Aufnahmen gemittelt. Jedes Bild wurde dann in 30×30 Bereiche¹ eingeteilt und jedem der Mittelwert der 100 enthaltenen Pixel zuge-

¹entsprechend der maximalen Auflösung von 0.4 mm

ordnet. Trägt man diese 900 Intensitätswerte für eine Faserposition auf (Abbildung 5.3) erkennt man den Einfluß von folgenden systematischen Fehlern auf den Randbereich der Ausgangsfläche:

- beim Ankoppeln der Lichtmischer an die Streuscheibe herausgequollenes optisches Fett verwischt den Rand des Ausgangsfensters
- kleine Größenabweichungen der Ausgangsfläche untereinander
- schief angekoppelte Lichtmischer

Um den Einfluß dieser Fehler zu unterdrücken, wurden die am äußeren Rand liegenden Bins in der weiteren Auswertung nicht berücksichtigt. Dies entspricht auf der Ausgangsfläche einem abgeschnittenen Rand von $0,4 \text{ mm}$ Breite.

Befindet sich die Lichtquelle am Rand der Eingangsfläche, so verläuft ein wesentlicher Teil der Schatten in diesem Randbereich und wird in der nachfolgenden Analyse nicht berücksichtigt. Dies führt zu einer leichten Überhöhung der Intensitätswerte und zum andern erscheint die Ausleuchtung der Ausgangsfläche homogener.

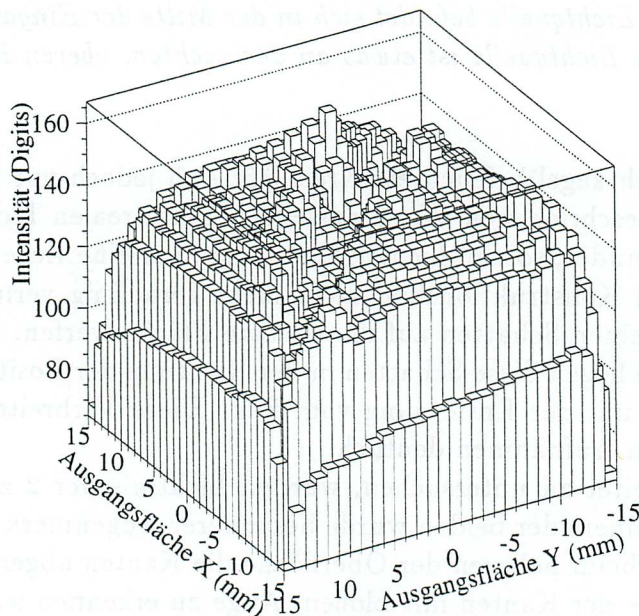


Abbildung 5.3: Die Ausleuchtung der Ausgangsfläche von Lichtmischer 3 gemessen mit Lichtquelle 1. Die äußeren Bins, welche entlang dem Rand abfallende Intensität zeigen, weisen auf eine leicht schräge Ausrichtung des Lichtmischers hin.

Um Aussagen für verschieden große Photokathoden machen zu können, wurden zur weiteren Analyse die Bereiche innerhalb der folgenden vier Radien benutzt:

1. Der Außenkreis, mit Radius $7,9 \text{ mm}$, der alle Bereiche einbezieht, entsprechend einer Photokathode, die größer als die Ausgangsfläche des Lichtmischers ist.

2. Der flächengleiche Kreis, mit Radius $6,26 \text{ mm}$, der die Hälfte der Randpunkte einbezieht, aber die Ecken nicht enthält.
3. Der Innenkreis, mit Radius $5,9 \text{ mm}$, der ganz innerhalb der Ausgangsfläche liegt.
4. Der Kreis mit dem Radius $4,47 \text{ mm}$, dessen Fläche der halben Ausgangsfläche entspricht.

Für jeden Kreis wurde die Summe der Intensitätswerte gebildet und auf die gesamte Lichtmenge der Ausgangsfläche des Lichtmischer normiert. Dieser Wert dient als Maß für die absolute Lichtmenge, die eine Photokathode der entsprechenden Größe detektieren würde.

Abbildung 5.4 zeigt die Intensität von Lichtmischer 3, der mit der Lichtquelle 1 beleuchtet wurde. Die gesamte Ausgangsfläche (Radius $> 7,9 \text{ mm}$) ist hierbei in die Analyse einbezogen.

Die X-Y-Ebene in Abbildung 5.4 links, entspricht der Faserposition in mm . Entlang der Z-Achse ist das Intensitätsmaß in Digits aufgetragen. Man sieht, daß von den Ecken der Eingangsfläche weniger Licht die Ausgangsfläche erreicht. Zudem wird die Ausgangsfläche von den Ecken der Eingangsfläche weniger homogen beleuchtet. Dieses für alle Lichtmischer typische Verhalten ist umso stärker ausgeprägt, je größer der Öffnungswinkel des Pyramidenstumpfes ist. Daher wurde in der weiteren Auswertung das $12 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ große Quadrat in der Mitte der Eingangsfläche der Lichtmischer getrennt betrachtet.

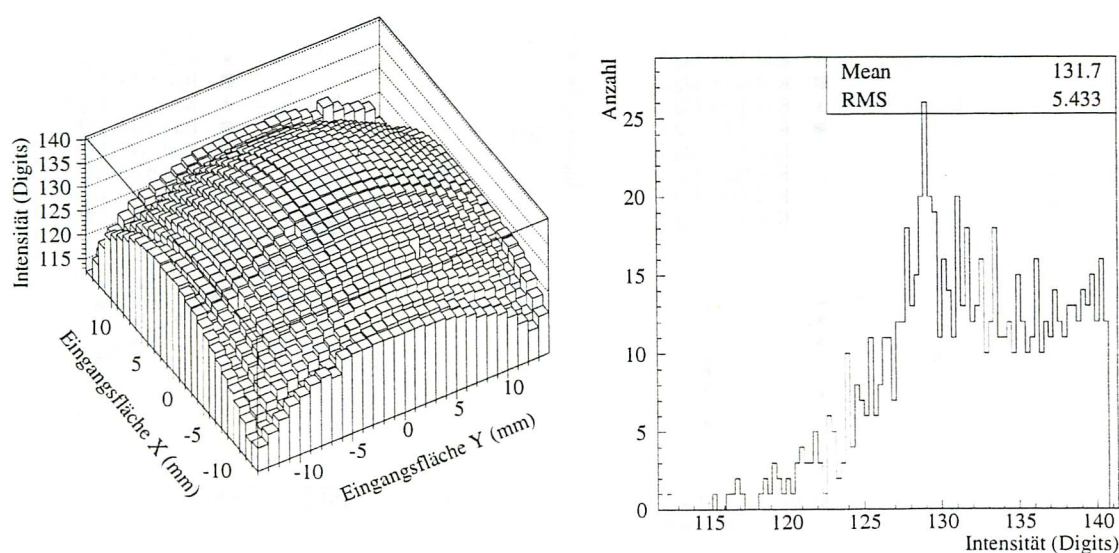


Abbildung 5.4: Die Gesamtintensität an der Ausgangsfläche
 Links: Die Intensität, aufgetragen entsprechen der Faserposition an der Eingangsfläche.
 Rechts: Die Häufigkeitsverteilung der Intensitätswerte.

Aus der Häufigkeitsverteilung von Abbildung 5.4 rechts wurde der Mittelwert und die Breite zur weiteren Analyse verwendet. Entsprechende Diagramme wurden für jeden

Lichtmischer, beide Lichtquellen, und alle Analyseradien erstellt. Einmal für die gesamte Eingangsfläche als auch für das $12\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ große Fenster in ihrer Mitte. Für jeden der 4 Lichtmischer wurde der Mittelwert der Häufigkeitsverteilung der Intensität innerhalb der Analyseradien in die Diagramme von Abbildung 5.5 eingezeichnet. Dabei entsprechen die Positionen der Punkte auf der X-Achse dem Lichtmischer und damit den Öffnungswinkeln von 0° , $7,6^\circ$, $15,2^\circ$ und $22,6^\circ$.

Es zeigt sich, daß die totale Lichtmenge von Lichtmischer 1 hin zu Lichtmischer 4, also mit größer werdendem Öffnungswinkel des Lichtmischers, abnimmt. Aus dem Diagramm in Abbildung 5.5 rechts, in dem die totale Lichtmenge auf die Fläche des Analysebereichs normiert wurde, sieht man, daß die Intensitätsunterschiede der einzelnen Analyseradien, ihrem Flächenunterschied entsprechen und damit ein geometrischer Effekt sind. Von der schmaleren Lichtverteilung von Lichtquelle 1 erreichen bei Lichtmischer 4 noch ca. 55% des Lichts die Ausgangsfläche; bei der breiteren Verteilung von Lichtquelle 2 sogar nur 40%. Das Licht der Positionen im Innern des $12\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ großen mittleren Quadrat der Eingangsfläche wird entsprechend abgeschwächt auf 65% (Lichtquelle 1) bzw. 45% (Lichtquelle 2). Dies weist darauf hin, daß ein Teil des unter großem Winkel in den Lichtmischer eintretenden Lichts auf seinem Weg zur Ausgangsfläche den Grenzwinkel der Totalreflektion überschreitet und aus dem Lichtmischer austritt. Der Lichtverlust von Lichtmischer 2 – 4 ist jedoch geringer als das Verhältnis von Eingangsfläche zu Ausgangsfläche. daraus folgt, daß in den konisch zulaufenden Lichtmischern eine Bündelung stattfindet.

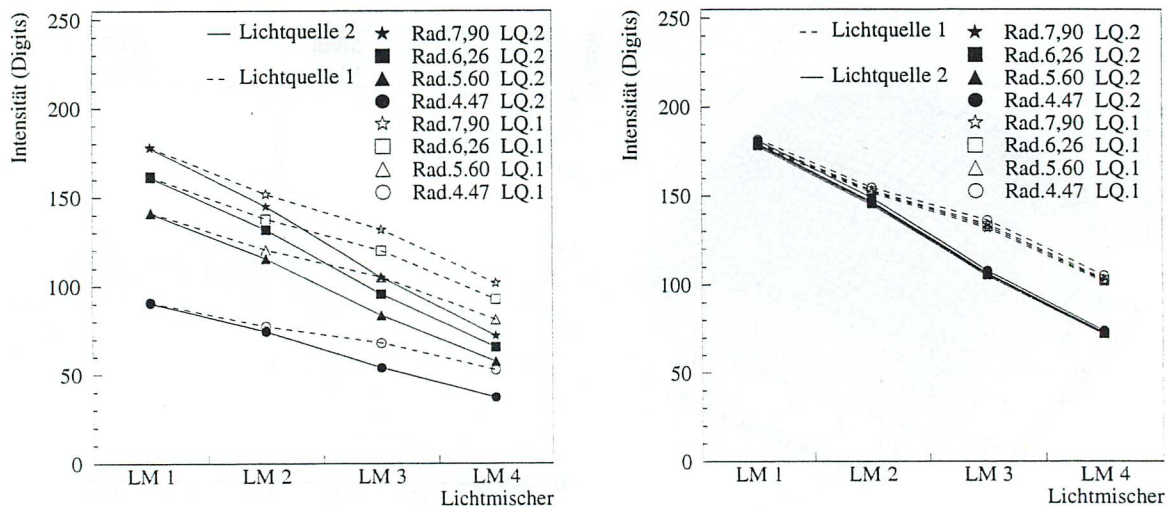


Abbildung 5.5: Die Mittelwerte der Intensitätsverteilung an den Ausgangsflächen der Lichtmischer aufgetragen gegen die Lichtmischer.

Links: Die Werte für alle Analyseradien der Ausgangsfläche.

Rechts: Die Werte der unterschiedlichen Analyseradien wurden auf gleiche Fläche normiert.

Die Diagramme in Abbildung 5.6 zeigen die entsprechenden Breiten der Häufigkeitsverteilung der Intensität. Als Maß für die Breite wurde die Standardabweichung benutzt

und getrennt nach Lichtquelle und Analyseradius gegen die Lichtmischer aufgetragen. Die Breiten des $12\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ großen Bereichs in der Mitte der Eingangsfläche liegt für alle Positionen der Lichtquelle unter einem Wert von zwei Digits. Weder zeigen die beiden Lichtquellen deutlich unterschiedliches Verhalten, noch ist bei den Lichtmischern eine Tendenz zu beobachten. Betrachtet man jedoch die gesamte Eingangsfläche, so nimmt die Breite der Intensitätsverteilung von Lichtmischer zu Lichtmischer zu. Dies bestätigt, daß vor allem bei den äußeren Positionen der Eingangsfläche und ihren Eckbereichen ein Intensitätsverlust auftritt. Der Anstieg der Breite mit dem Öffnungswinkel des Lichtmischers, sowie die unterschiedliche Stärke des Anstiegs bei den beiden verwendeten Lichtquellen, legt folgende Erklärung nahe: Im Kantenbereich ergibt sich ein größerer Einfallswinkel für die Lichtstrahlen im Vergleich zur Seitenfläche, so daß an den Kanten ein größerer Lichtverlust auftritt. Der Anteil von Licht innerhalb des Lichtkegels, der auf den „Kantenbereich“ trifft, steigt, je näher die Lichtquelle einem Eck der Eingangsfläche kommt und je schmäler die Lichtverteilung ist.

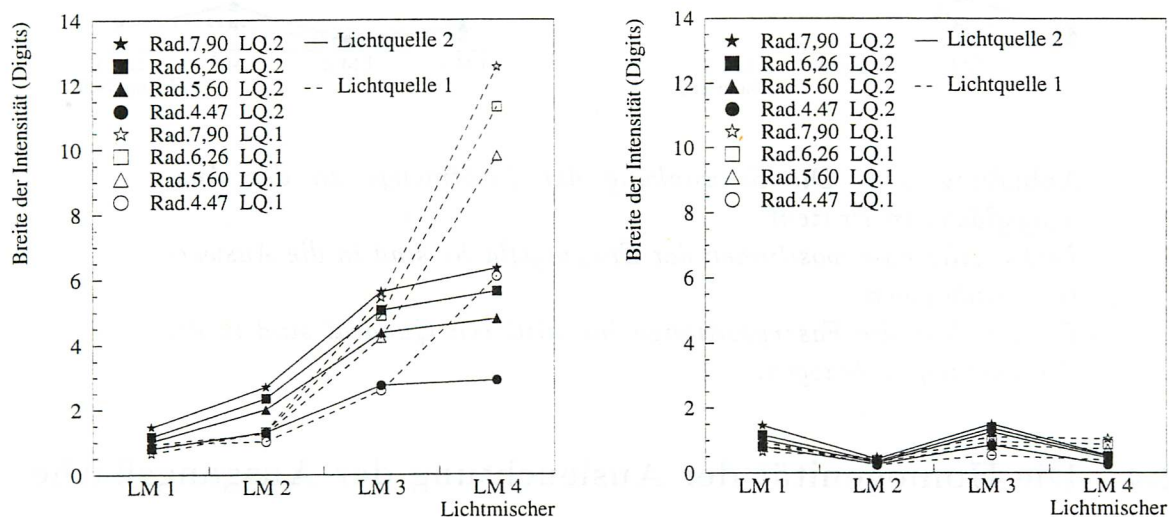


Abbildung 5.6: Die Breite der Intensitätsverteilung an den Ausgangsflächen der Lichtmischer, aufgetragen gegen die Lichtmischer. Links: Alle Faserpositionen der Eingangsfläche sind in die Auswertung einbezogen.

Rechts: Nur die Faserpositionen im mittleren Quadrat sind in die Auswertung einbezogen.

Zur Bewertung der Eignung des Lichtmischers ist die Schwankung der Lichtmenge an der Ausgangsfläche bei verschiedenen Faserpositionen an der Eingangsfläche entscheidend. Als Maß für die Schwankung dient das Verhältnis von Breite zu Mittelwert der Intensitätsverteilung in Prozent, wie es in Abbildung 5.7 aufgetragen ist. Dies entspricht dem Beitrag zur Schwankung des Photomultipliersignals, der von diesem Effekt verursacht wird. Die Schwankung erweist sich als relativ unabhängig vom gewählten Analyseradius. Für die verschiedenen Lichtquellen weist bei Lichtmischer 1-3 die schmale Winkelverteilung, bei Lichtmischer 4 die breite Winkelverteilung die geringeren Werte auf. Bei Lichtmischer 1 liegt der Beitrag zur Inhomogenität des Ausgangssignals des Photomultipliers bei maximal 1% und steigt auf 8% (Lichtquelle 2) bzw. 12%

(Lichtquelle 1). Dabei zeigen wieder die Eckpunkte der Eingangsfläche die großen Intensitätseinbrüche. Bei den Positionen im mittleren Quadrat der Eingangsfläche liegen die Schwankungen zwischen 1% und 2%.

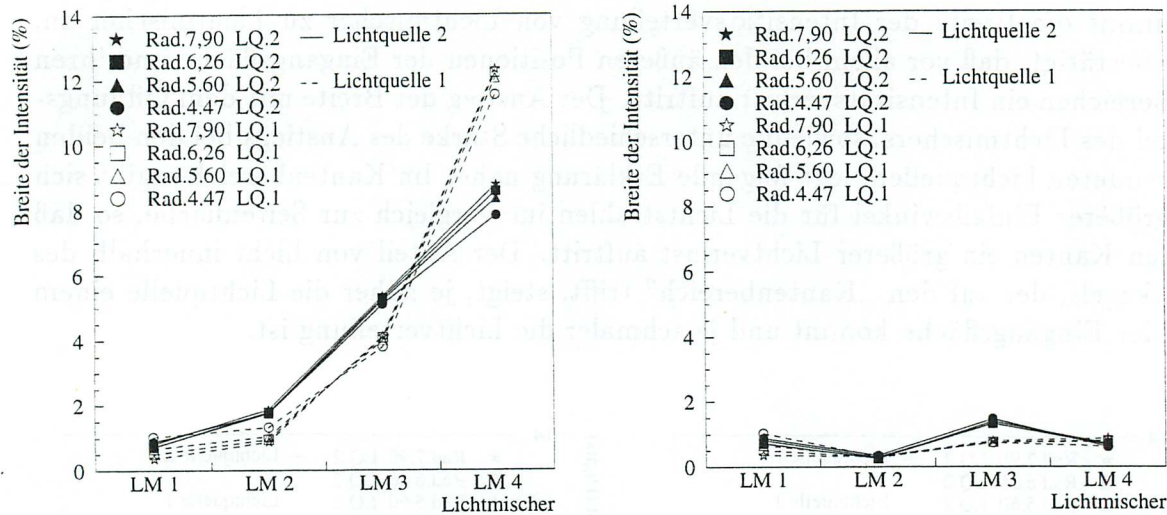


Abbildung 5.7: Die Schwankung der Lichtmenge an der Ausgangsfläche in Prozent.

Links: Alle Faserpositionen der Eingangsfläche sind in die Auswertung einbezogen.

Rechts: Nur die Faserpositionen im mittleren Quadrat sind in die Auswertung einbezogen.

5.2.4 Die Homogenität der Ausleuchtung der Ausgangsfläche

Um ein Maß für die Beleuchtungsinhomogenität der Ausgangsfläche zu erhalten, wurde innerhalb jedes Analyseradius die Intensitäten dergestalt normiert, daß der Mittelwert 1 ergibt und daraufhin die Standardabweichung berechnet. Sie bildet das Maß dafür, mit welcher Gleichmäßigkeit die Photokathode von der jeweiligen Faserposition aus beleuchtet wird.

Einer optimal gleichmäßig beleuchteten Fläche entspricht der Wert 0. Sie würde eine inhomogene Photokathode vollständig kompensieren. Faltet man eine Intensitätsverteilung von x mit einer Photokathode vom Inhomogenitätswert y so erhält man in erster Näherung eine Schwankung des Ausgangssignals von $x \times y$.

Zum Beispiel entspricht einer Beleuchtung die zur Hälfte 10% unter dem Mittelwert und zur anderen Hälfte 10% über dem Mittelwert liegt der Homogenitätswert 0,1.

Einer Photokathode deren eine Hälfte die doppelte Verstärkung aufweist als ihre andere Hälfte, entspricht die Homogenität 0,33. Je nach Ausrichtung der Flächen zueinander schwankt das Ausgangssignal dieses Photomultipliers um $\pm 0,033$, also $\pm 3,3\%$. In diesem Sinne ist das Homogenitätsmaß also der Faktor, um den die Auswirkungen der Photokathodeninhomogenität gemildert werden. Nach [Zub 95] und [Hec 94] zeigen die Kathoden der im SPACAL eingesetzten Photomultiplier im Magnetfeld näherungsweise die typische Empfindlichkeitsstruktur von Abbildung 5.8. Sie ist charakterisiert

durch einen Wall am äußeren Rand der Photokathode, der eine doppelte Empfindlichkeit bezüglich der Mitte aufweist.

Die in Abbildung 5.8 generierte Empfindlichkeit mit dem Radius von $6,8 \text{ mm}$ entspricht einer Homogenität von $0,3$. Dies kann als konservative Abschätzung der Verhältnisse bei den SPACAL-Photomultipliern gelten.

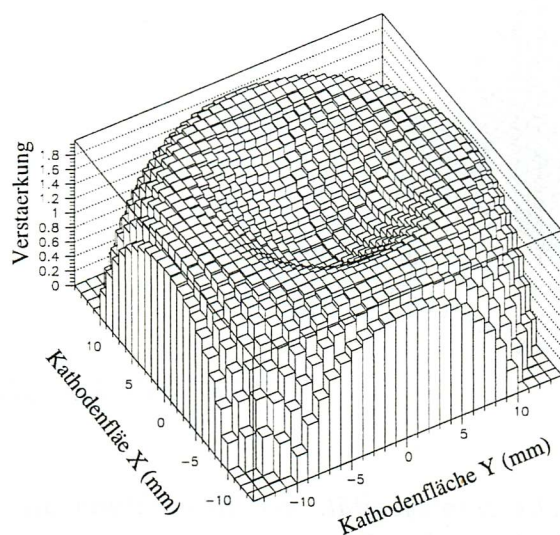


Abbildung 5.8: Die angenommene Verstärkung eines Photomultipliers im Magnetfeld. Die Kathode hat einen Radius von 6 mm und einen Homogenitätswert von $0,3$.

Für die Bewertung der Ausleuchtung der Ausgangsfläche wurde für jede Kombination von Lichtmischer, Lichtquelle und Analyseradius das Homogenitätsmaß ermittelt und aufgetragen.

Abbildung 5.9 zeigt beispielsweise das Ergebnis von Lichtmischer 3 mit Lichtquelle 1 und einem Analyseradius $> 7,9 \text{ mm}$, der die gesamte Ausgangsfläche überdeckt. Wiederum wurden die Mittelwerte und die Breiten der Homogenitätsverteilungen aller Lichtmischer und Analyseradien zur weiteren Analyse benutzt.

Die Diagramme in Abbildung 5.10, die die Homogenität für die gesamte Eingangsfläche und ihr mittleres Quadrat zeigen, erinnern an die Diagramme der Breite der Intensitätsverteilung (Abbildung 5.6). Im inneren Quadrat der Eingangsfläche macht sich für beide Lichtquellen gleichermaßen ein leichter Anstieg der Inhomogenität bemerkbar.

Betrachtet man die gesamte Eingangsfläche, so ist vor allem für die schmalverteilte Lichtquelle ein stärkerer Anstieg zu verzeichnen. Es bestätigt sich somit auch hier, daß die von den Kanten geworfenen Schatten den dominierenden Effekt darstellen. Die Ecken stellen die Bereiche mit dem größten Werten bis zu $0,2$ dar. Dies bedeutet, daß die Inhomogenitäten der Photomultiplierkathode bei jedem der Lichtmischer zumindest auf 20% reduziert werden. Bei einer Mindesthomogenität der Photomultiplierkathode des SPACAL von $0,33$, wie sie durch Vorauswahl garantiert ist, ergibt sich im schlechtesten Fall (Ecke von Lichtmischer 4, Analyseradius $7,9 \text{ mm}$, Homogenitätswert $0,2$),

ein maximaler Beitrag zur Signalinhomogenität von 7%. Im besten Fall (Mitte von Lichtmischer 1, Analyseradius 4,47 mm, Homogenitätswert 0,03) erhält man einen Beitrag von 1%.

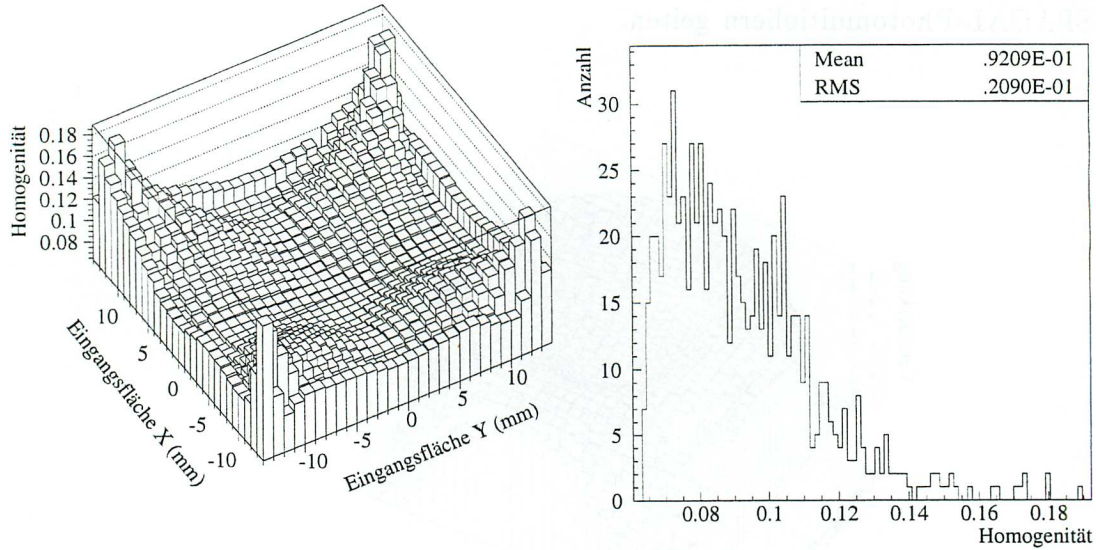


Abbildung 5.9: Die Homogenität, der Beleuchtung an der Ausgangsfläche von Lichtmischer 3.

Links: Die Homogenität aufgetragen entsprechend der Faserpositionen an der Eingangsfläche.

Rechts: Die Häufigkeitsverteilung der Homogenitätswerte.

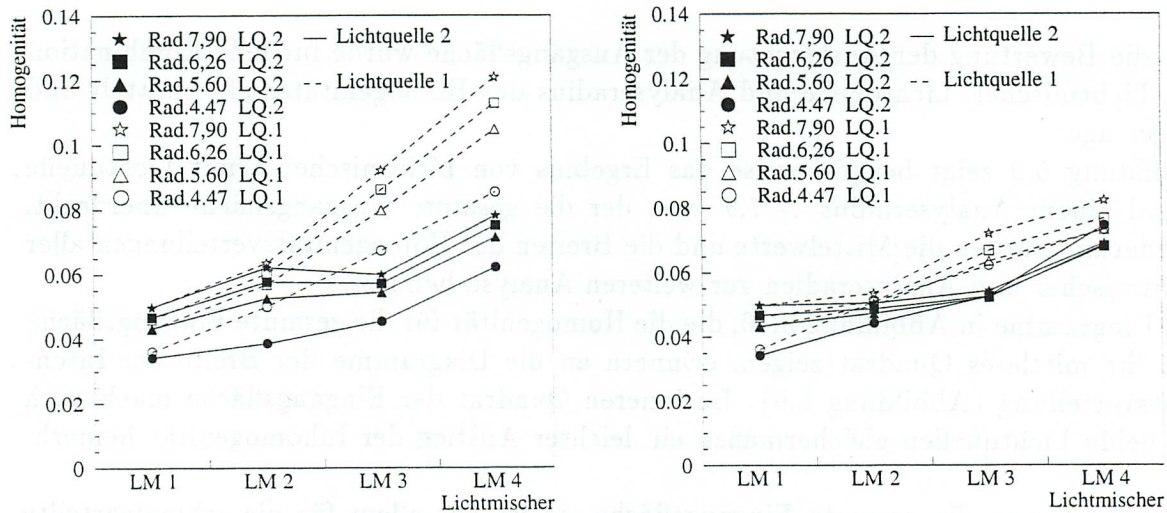


Abbildung 5.10: Die Mittelwerte der Homogenitätsverteilung an den Ausgangsflächen der Lichtmischer für alle Analyseradien, aufgetragen gegen die Lichtmischer.

Links: Die Werte für alle Positionen der Eingangsfläche.

Rechts: Die Werte für das mittlere Quadrat der Eingangsfläche.

5.2.5 Die Gesamthomogenität

Wie im Abschnitt 5.2.4 an Beispielen schon erläutert, kann man die Schwankungen, die das Ausgangssignal eines Photomultipliers zeigen würde, nach folgender Formel aus den Meßwerten abschätzen:

$$\Gamma_{ges} = \Gamma_{Int} + \frac{\Gamma_{Hom_{Lm}} \times \Gamma_{Hom_{Pm}}}{100}$$

Γ_{ges} = Schwankung der Photomultipliersignals

Γ_{Int} = Schwankung der Lichtmenge in %

$\Gamma_{Hom_{Lm}}$ = Schwankung der Homogenität der Ausgangsfläche in %

$\Gamma_{Hom_{Pm}}$ = Schwankung der Photokathodenempfindlichkeit in %

Für die Gesamtschwankung im Ausgangssignal eines Photomultipliers, dessen Photokathode eine Homogenität von 0,33 aufweist, erhält man Werte entsprechend Abbildung 5.11 links. Sie kann als der schlechteste Fall angenommen werden.

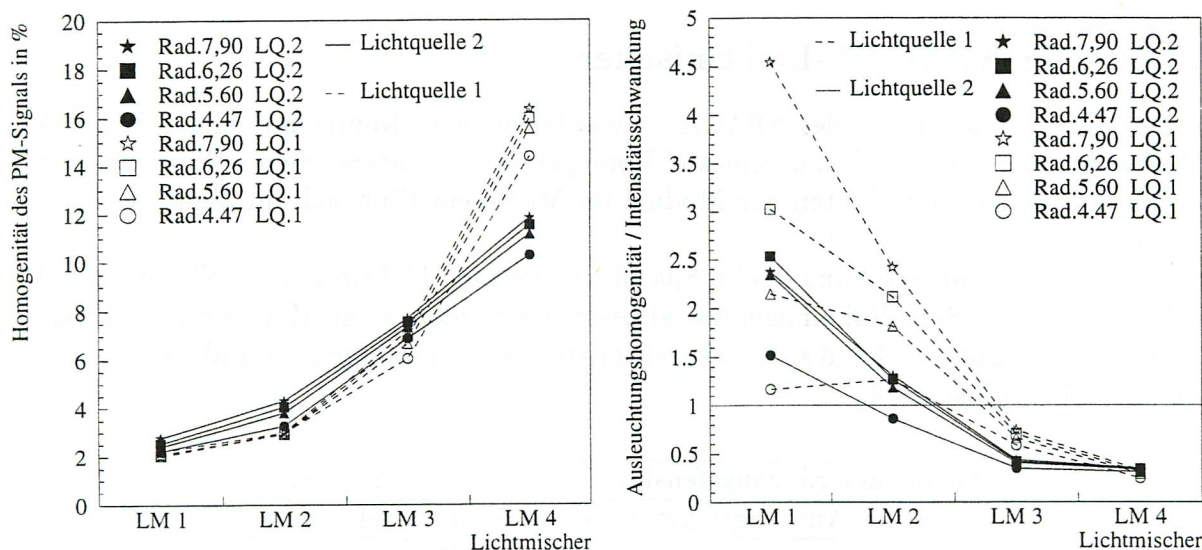


Abbildung 5.11:

Rechts: Die zu erwartende maximale Schwankung im Ausgangssignal eines Photomultipliers.

Links: Das Verhältnis der beiden Beiträge zur Gesamtschwankung des Photomultipliersignals.

Das beste Resultat erzielt Lichtmischer 1 mit einer Gesamtunsicherheit von 2%. Die drei anderen Lichtmischer haben je nach Lichtquelle und Analyseradius eine Gesamtschwankung von 2,5% - 4% (Lichtmischer 2), 6% - 8% (Lichtmischer 3) und 10% - 12% bzw. 15% - 17% bei Lichtmischer 4 je nach Winkelverteilung der Lichtquelle.

Weiterhin zeigt sich, daß die Lichtquelle 1 mit der schmaleren Winkelverteilung bei den Lichtmischern 1 - 3 eine ca. 1% geringere Gesamtschwankung zeigt. Bei Lichtmischer 4 jedoch ist sie um 5% größer. Dies läßt den Schluß zu, daß bei einem Öffnungswinkel

zwischen 15° und 20° die Lichtverluste der äußeren Bereiche der Eingangsfläche so groß werden, daß sie den dominierenden Effekt darstellen.

Um den Anteil der beiden Effekte „schwankende Lichtmenge“ und „inhomogene Ausleuchtung“ an der Gesamtschwankung abschätzen zu können wurde ihr Verhältnis gegen die Lichtmischer in Abbildung 5.11 rechts aufgetragen. Zum Vergleich der Beiträge zur Schwankung des Photomultipliersignals wurde die Homogenität der Ausgangsfläche wieder mit 0,33 gewichtet. Die Abbildung zeigt, daß bei den Lichtmischer mit guter Gesamthomogenität (Lichtmischer 1 und 2) die inhomogene Ausleuchtung der Ausgangsfläche den Hauptbeitrag darstellt. Bei den Lichtmischem 3 und 4 wird der Lichtverlust vom Rand der Eingangsfläche aufgrund des großen Öffnungswinkels so gravierend, daß er den Hauptanteil an der Gesamtschwankung ausmacht.

In den Abbildungen 5.9 und 5.4 erkennt man deutlich, daß in den Eckbereichen der Eingangsfläche sowohl die Einbußen bei der totalen Lichtmenge, als auch die Inhomogenität der Ausleuchtung der Ausgangsfläche am Größten sind. Somit liegt der Schluß nahe, daß in den Eckbereichen auch die größte Gesamtschwankung zu erwarten ist. Diese Frage wird im nächsten Kapitel speziell für den Lichtmischer des SPACAL untersucht.

5.2.6 Der SPACAL-Lichtmischer

In der Entwicklungsphase des SPACAL's wurden einige Module mit einer β -Quelle abgescannt², um sie unter anderem auf Homogenität zu untersuchen. Dabei zeigten sich an den Ecken und Kanten der Module im Mittel ein Einbruch im Signal von 5% [Leh 94].

In der folgenden Untersuchung des im Spacal eingesetzten Lichtmischers soll sein Anteil an der gefundenen Signalinhomogenität abgeschätzt werden, seine Maße sind in Tabelle 5.2 aufgeführt. Entsprechend seiner charakteristischen Parameter L/A und δ entspricht er in etwa Lichtmischer 2.

Größe des Eingangsfensters	26 mm × 26 mm
Größe des Ausgangsfensters A	14,5 mm × 14,5 mm
Länge L	69 mm
Verhältnis von L/A	4,76
Öffnungswinkel δ	9.5°

Tabelle 5.2: Maße und Parameter des im SPACAL eingesetzten Lichtmischers.

Die Lichtempfindlichkeit der Photomultiplier wird im SPACAL durch ein Kalibrationsystem ständig gemessen. Es leitet über zwei Fasern Lichtpulse auf die Photokathode. Diese Fasern sind in der Mitte von zwei gegenüberliegenden Seitenflächen, ca. 6 mm von der Ausgangsfläche entfernt, 1,5 mm tief, schräg nach vorne in den Lichtmischer eingeklebt.

²Inzwischen wurden alle im SPACAL eingesetzten Modulen auf diese Weise vermessen.

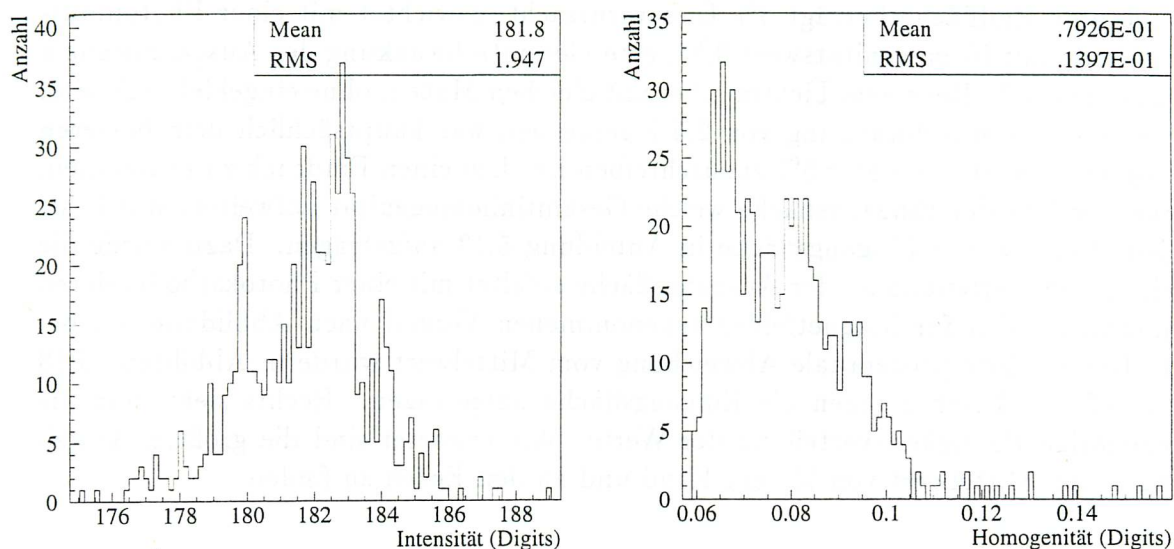


Abbildung 5.12: Die Ergebnisse der Untersuchung des SPACAL-Lichtmischers
 Rechts: Die Intensitätsverteilung
 Links: Die Homogenitätsverteilung

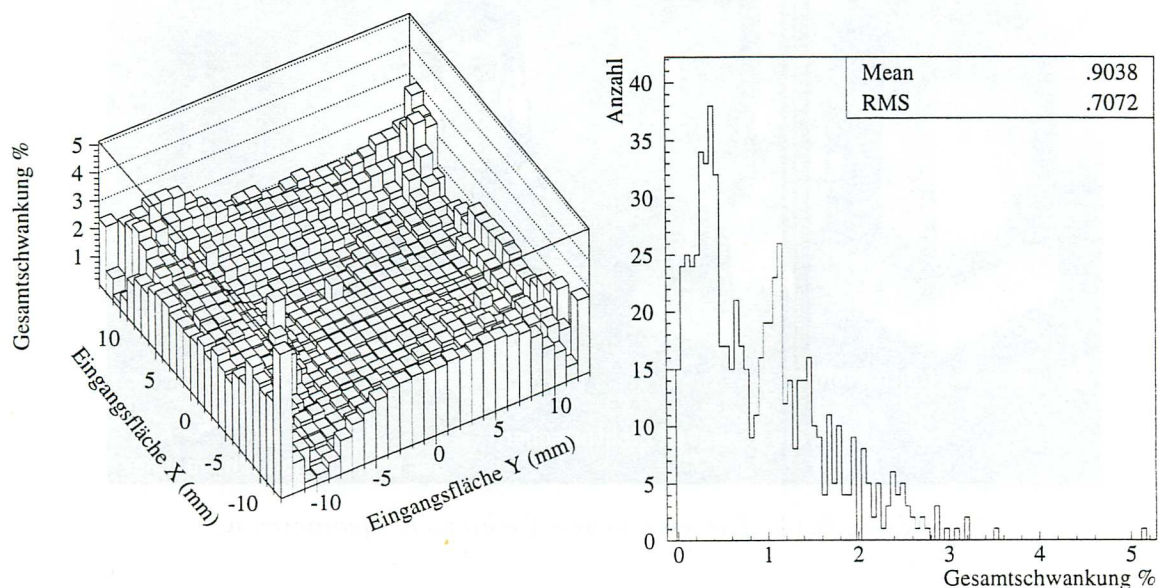


Abbildung 5.13: Die Gesamtschwankung des SPACAL-Lichtmischers in Prozent
 Rechts: Die Schwankung, entsprechend der Position an der Eingangsfläche
 Links: Die Häufigkeitsverteilung der Schwankungswerte

Beim Abscannen dieses Lichtmischers zeigte sich wiederum der größte Lichtverlust in den Ecken der Eingangsfläche. Er liegt bei 3% des Maximalwertes. Die Standardabweichung der Lichtintensität an der Ausgangsfläche des Lichtmischers bei Variation der

Faserposition über die gesamte Eingangsfläche liegt bei 1.1%. Die Homogenität der beleuchteten Endfläche beträgt 8%. Dies verursacht, gewichtet mit einer Photomultiplierkathode mit Homogenitätswert 0,33, eine Gesamtschwankung des Ausgangssignals von maximal 4%. Bei einem Lichtmischer mit gleichen Maßen, ohne eingeklebte Fasern, wurde eine Gesamtschwankung von 2,5% gemessen, was hauptsächlich dem besseren Homogenitätswert von unter 5% zuzuschreiben ist. Um einen Eindruck zu bekommen, welche Bereiche der Eingangsfläche welche Gesamtinhomogenität aufweisen, wurde sie für jede Position der Eingangsfläche in Abbildung 5.13 aufgetragen. Dazu wurde die jeweilige Lichtverteilung an der Ausgangsfläche gefaltet mit einer Photokathode, deren Homogenität, den für Magnetfelder angenommenen Verlauf nach Abbildung 5.8 besitzt. Die absolute prozentuale Abweichung vom Mittelwert wurde in Abbildung 5.13 links, auf der Z-Achse gegen die Eingangsfläche aufgetragen. Rechts sieht man die dazugehörige Häufigkeitsverteilung der Werte. Wie erwartet sind die größten Abweichungen von Mittelwert von 3% am Rand und an den Ecken zu finden.

5.3 Neue Lichtmischergeometrien



Abbildung 5.14: Die vier neuen Lichtmischergeometrien.

Vier neue Lichtmischergeometrien (siehe Abbildung 5.14) wurden im Rahmen der Diplomarbeit zusätzlich vermessen. Davon wurde ein dreieckiger Lichtmischer und zwei mit konkaven Seitenflächen von der mechanischen Werkstatt des Instituts hergestellt. Der Lichtmischer mit den konvexen Seitenflächen wurde schon für die Vorversuche im Rahmen des SPACAL-Aufbaus gefertigt.

5.3.1 Lichtmischer mit konvexen Seitenflächen

Beim Lichtmischer mit den konvexen Seitenflächen aus Abbildung 5.15 wirken die Seitenflächen wie Hohlspiegel. Der aus der Lichtquelle austretende Lichtkegel wird zu

zwei, zueinander orthogonalen, schmalen Streifen auf der Ausgangsfläche gebündelt. Dies läuft der Aufgabe eines Lichtmischers entgegen. Von jeder Position auf der Eingangsfläche zeigte sich das für diesen Lichtmischer typische Kreuz in Abbildung 5.15. Eine Untersuchung der gesamten Eingangsfläche entsprechend Kapitel 5.2 war nicht sinnvoll, da die Inhomogenität der Ausleuchtung der Ausgangsfläche den dynamischen Bereich der Kamera überschritt. Diese Form kann als Lichtmischer ausgeschlossen werden.

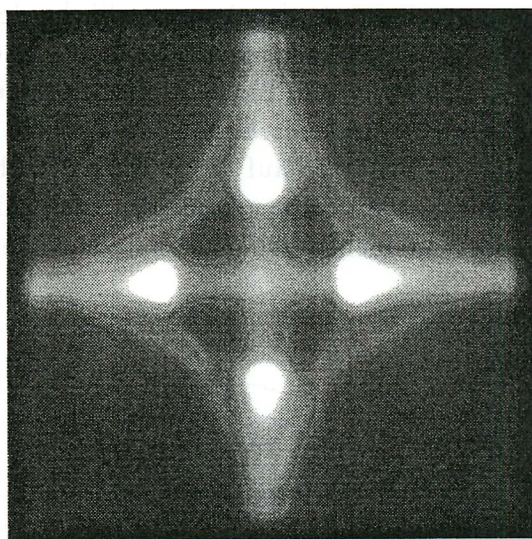


Abbildung 5.15: Das Beleuchtungsmuster auf der Ausgangsfläche des konvexen Lichtmischers.

5.3.2 Lichtmischer mit konkaven Seitenflächen

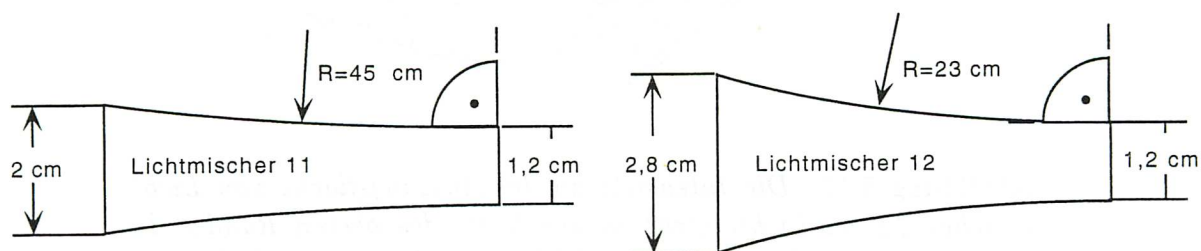


Abbildung 5.16: Längsschnitt durch die beiden konvexen Lichtmischer.
 Rechts: Lichtmischer 11 mit einer Eingangsfläche von $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$
 Links: Lichtmischer 12 mit einer Eingangsfläche von $28 \text{ mm} \times 28 \text{ mm}$

Von Lichtmischern mit konkaven Seitenflächen, wie die in Abbildung 5.16 wurden zwei vorteilhafte Effekte erwartet:

1. Der effektive Öffnungswinkel wird zur Ausgangsfläche hin flacher. Dadurch wird in diesem Bereich, in dem die meisten Reflektionen stattfinden, ein Überschreiten des Grenzwinkels der Totalreflektion unwahrscheinlicher. Alles Licht sollte die Ausgangsfläche erreichen.

2. Der von einer konkaven Fläche reflektierte Lichtkegel wird im Gegensatz zu einer konvexen Fläche aufgeweitet. Dies fördert eine vielfache Überlagerung der Ausgangsfläche und damit eine homogene Ausleuchtung der Ausgangsfläche.

Die Maße der konkaven Lichtmischer wurden so gewählt, daß Eingangsfläche, Ausgangsfläche und Länge mit denen von Lichtmischer 2 bzw. Lichtmischer 3 übereinstimmen. Dadurch ist ein direkter Vergleich der Ergebnisse beider Geometrien möglich. Auch bei diesen Lichtmischern erscheint an der Ausgangsfläche der „gekreuzte“ Schatten der vier Kanten. Zudem wurde die Ausgangsfläche vom Rand der Eingangsfläche sehr inhomogen beleuchtet. Der dort in den Lichtmischer eintretende Lichtkegel kann einen Teil der Ausgangsfläche nicht direkt erreichen, da sich die Seitenflächen in den Strahlengang beugen, was sich als Schatten auf der Ausgangsfläche bemerkbar macht. In Tabelle 5.3 sind die Ergebnisse der beiden konkaven Lichtmischer 11 und 12 sowie, zum Vergleich, die Werte von Lichtmischer 2 aus einer Meßung mit identischer Lichtquelle aufgeführt.

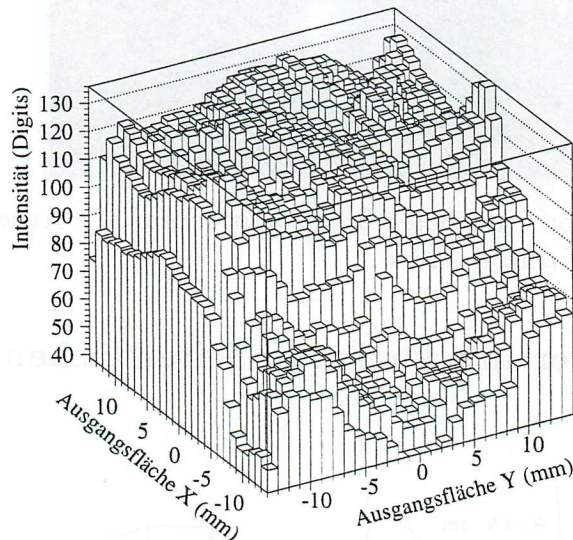


Abbildung 5.17: Die Intensität an der Ausgangsfläche von Lichtmischer 12 bei Lichteintritt in der Mitte des oberen Randes der Eingangsfläche. Der Intensitätsabfall im vorderen Bereich der Ausgangsfläche wird verursacht durch den Schatten der, in den direkten Lichtweg reichenden, Seitenfläche.

Erstaunlich ist, daß auch im Bereich des inneren Quadrats der Eingangsfläche bei beiden konkaven Lichtmischern schlechtere Werte gemessen wurden als beim vergleichbaren pyramidenförmigen Lichtmischer. Allerdings ist beim Vergleich zu beachten, daß diese Lichtmischer, aufgrund ihrer komplizierten Geometrie in ihren Maßen und Flächen nicht so exakt gearbeitet waren wie die der pyramidenförmigen Lichtmischer. Die deutlich schlechteren Werte für die gesamte Eingangsfläche lassen sich jedoch nicht darauf zurückführen.

Lichtmischer	2	11	12
mittlere Lichtmenge (Digit)	182	174	121
Schwankung der Lichtmenge	1%	8%	20%
Homogenität an der Ausgangsfläche	6%	15%	16%
Gesamtschwankung mit 0,33 gewichtet	3%	13%	25%

Tabelle 5.3: Die Resultate der konkaven Lichtmischer.

5.3.3 Ein konischer Lichtmischer mit dreieckigem Querschnitt

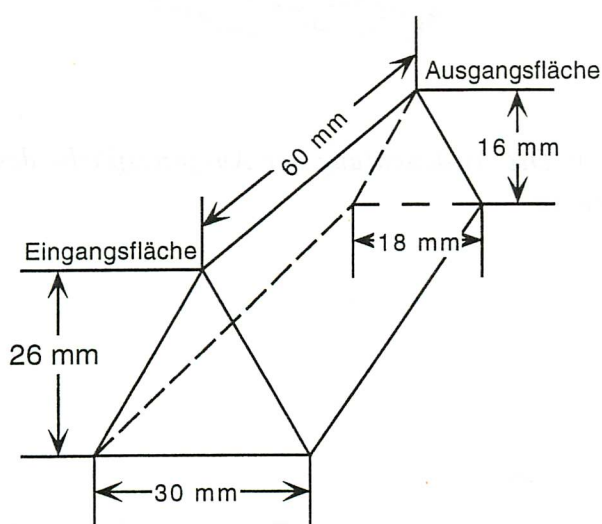


Abbildung 5.18: Die Maße des Lichtmischer mit dreieckigem Querschnitt

Eine weitere vermessene Lichtmischerform war ein konisch zulaufendes Volumen mit einem gleichseitigen Dreieck als Querschnittsfläche. Von der dreieckige Form werden nur drei Schatten auf der Ausgangsfläche, und damit eine gleichmäßigere Ausleuchtung derselben erwartet. Zudem weist die Querschnittsform die größte Abweichung von einem fokussierend wirkenden Kreis auf. Wiederum wurde die Eingangfläche und die Ausgangsfläche so gewählt, daß ihre Flächeninhalte denen des Lichtmischer 2 entsprechen. Erwartungsgemäß bildeten sich hier nun 3 Schatten auf der Ausgangsfläche (Abbildung 5.19). Diese Schatten überdecken jedoch einen größeren Anteil der Ausgangsfläche als die Schatten beim quadratischen Lichtmischer. Beim Abscannen dieses Lichtmischer zeigte sich wiederum der größte Lichtverlust in den Ecken der Eingangfläche. Er liegt bei 3% des Maximalwertes. Die Standardabweichung der Lichtintensität an der Ausgangsfläche des Lichtmischer beträgt 0,8%.

Die überhöhte Intensitäten der hinteren Kante sind wiederum auf die Nichtberücksichtigung des Randes der Ausgangsfläche zurückzuführen. Die Homogenität ihrer Ausleuchtung beträgt 11%. Somit erhält man nach der üblichen Abschätzung eine Gesamthomogenität 3%. Damit ist auch er schlechter als der vergleichbare Lichtmischer 2.

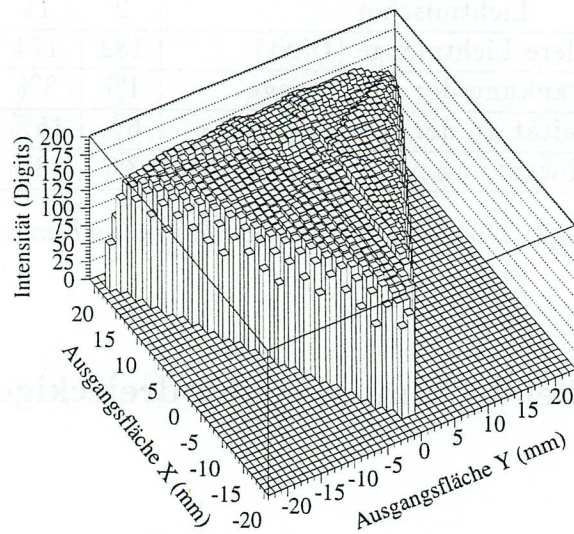


Abbildung 5.19: Die Ausleuchtung der Ausgangsfläche des dreieckigen Lichtmischers

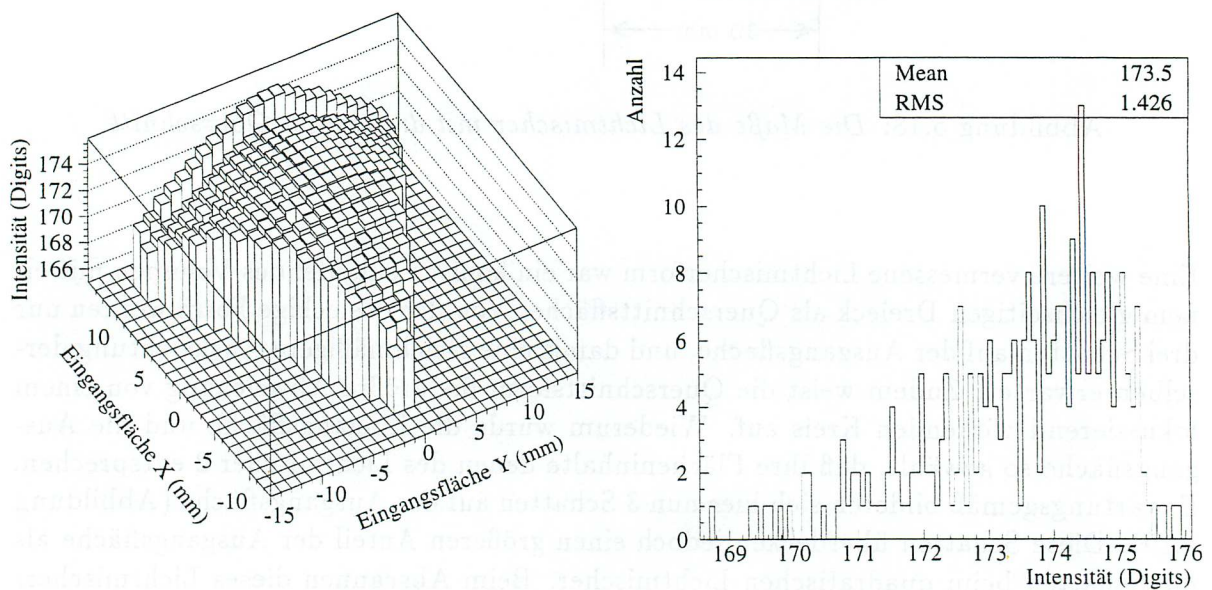


Abbildung 5.20: Das Ergebnisse der Intensitätsuntersuchung des dreieckigen Lichtmischers

Rechts: Die Intensitätswerte aufgetragen entsprechend der Position der Lichtquelle auf der Eingangsfläche

Links: Die Häufigkeitsverteilung der Intensitätswerte

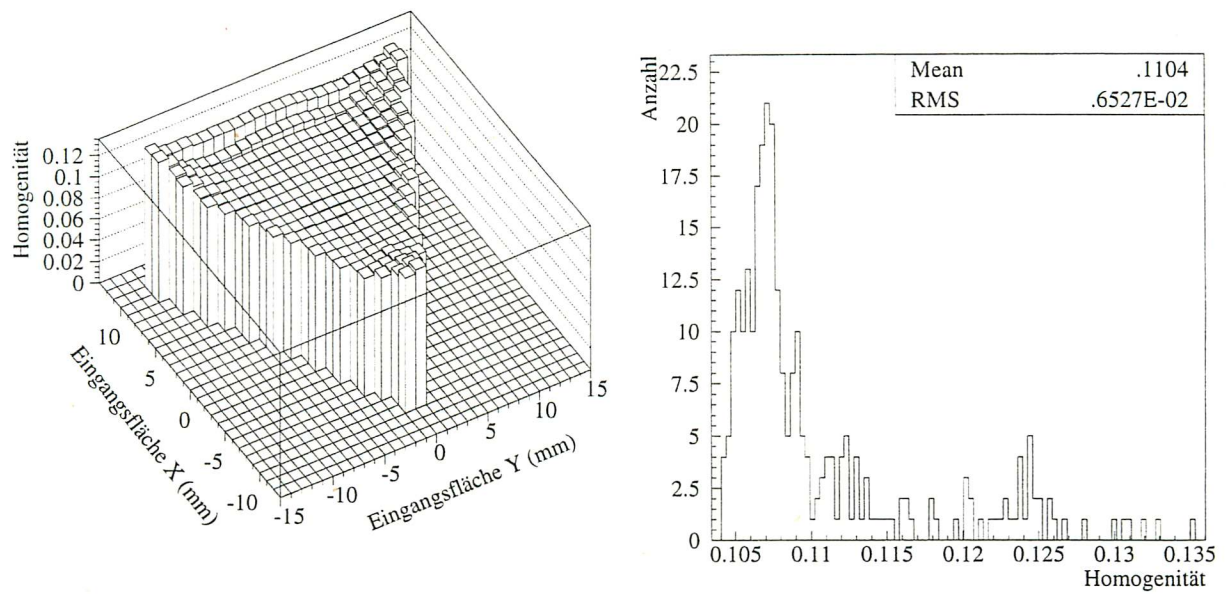


Abbildung 5.21: Das Ergebnisse der Homogenitätsuntersuchung des dreieckigen Lichtmischers

Rechts: Die Homogenitätswerte aufgetragen entsprechend der Position der Lichtquelle auf der Eingangsfäche

Links: Die Häufigkeitsverteilung der Homogenitätswerte



Abbildung 5.11: Die Ergebnisse der Messungen der ...
...
...
...
...
...
...

Kapitel 6

Die Simulation

6.1 Das Programm

Als Verständnishilfe für die Vorgänge im Lichtmischer wurde ein Simulationsprogramm in Fortran entwickelt. Es beruht auf der Berechnung des Wegs eines Lichtstrahls in einem geometrischen Körper mit reflektierenden Seitenflächen mit Mitteln der geometrischen Optik. Seine komplette Ein- und Ausgabe erfolgt mit Text bzw. HBOOK-Files, so daß es bequem als Hintergrundprogramm gestartet werden kann. Dies ist nötig, da die komplette Simulation eines Lichtmischers mehrere Tage Rechenzeit beanspruchen kann. Die Eingabe wurde in folgende drei unabhängige Files aufgeteilt:

Das Geometrie-File: Es enthält unter anderem die Beschreibung der Lichtmischerflächen, den Brechungsindex, die Güte der Reflektion und das Binning der Ausgangsfläche.

Das Lichtquellen-File: Es enthält die Positionen der Lichtquelle und Parameter zur Variation der Lichtstrahlen.

Das Photonen-File: Es enthält Richtungen und Intensitäten der Lichtstrahlen. Es kann entweder eine bestimmte Verteilung generiert oder aus der Winkelmessung einer Faser rekonstruiert werden.

Die Ergebnisse der Simulation werden als PAW-NTUPEL in einem HBOOK-File gespeichert. Sie stehen damit in gleicher Weise wie die Scandaten für eine Analyse mit PAW zur Verfügung. Zudem wird ein Ausgabertextfile zur Kontrolle des Programmablaufs erstellt.

Die Simulation beginnt an einer durch das Lichtquellenfile bestimmten Position. Es liest nacheinander die Lichtstrahlen (repräsentiert durch einen Richtungsvektor und eine Anfangsintensität) aus dem Photonenfile und verfolgt ihren Weg durch den Körper, bis sie entweder durch Abschwächung verloren sind oder die Ausgangsfläche erreicht haben. Diese ist zur Rekonstruktion des Bildes in $N \times N$ Bereiche (N ist Parameter im Geometrie-File) unterteilt. Der Auftreffpunkt eines Strahls an der Ausgangsfläche des Lichtmischers wird dann, entsprechend der Parameter der Eingabefiles, zu einem Quadrat aufgeweitet, und die Intensität auf die überdeckten Bereiche der Ausgangsfläche verteilt. Sind für eine Position alle Lichtstrahlen des Photonenfiles (ca. 250 000) in

dieser Art abgearbeitet, wird von der Ausgangsfläche der Mittelwert und das Homogenitätsmaß berechnet und zusammen mit dem Bild abgespeichert. Daraufhin wird die nächste Eingabeposition simuliert.

6.2 Die Resultate

6.2.1 Die Lichtverteilung auf der Ausgangsfläche

Aufgrund der Ergebnisse der Simulation konnte die Entstehung der Schatten durch Lichtverlust in den Kanten überprüft werden. Dazu wurde Lichtmischer 2 auf folgende vier Arten simuliert.

1. Mit perfekten Kanten
2. Mit einer perfekt reflektierenden Fase von $0,75\text{ mm}$ an jeder Kante.
3. Mit $0,75\text{ mm}$ Fasen mit einem Reflektionsvermögen von 10% als Kanten.
4. Mit Kanten deren Rundung durch zwei perfekt reflektierenden Flächen approximiert wurden. So daß eine Kante von drei, nahe beieinanderliegenden 150° Winkeln gebildet wird.

Während man bei der Simulation von 1 und 2 keinen Effekt sah, war das Ergebnis von Simulation 3 mit der Messung vergleichbar (siehe Abbildung 6.1). Auch die Simulation 4 zeigte einen Schatten.

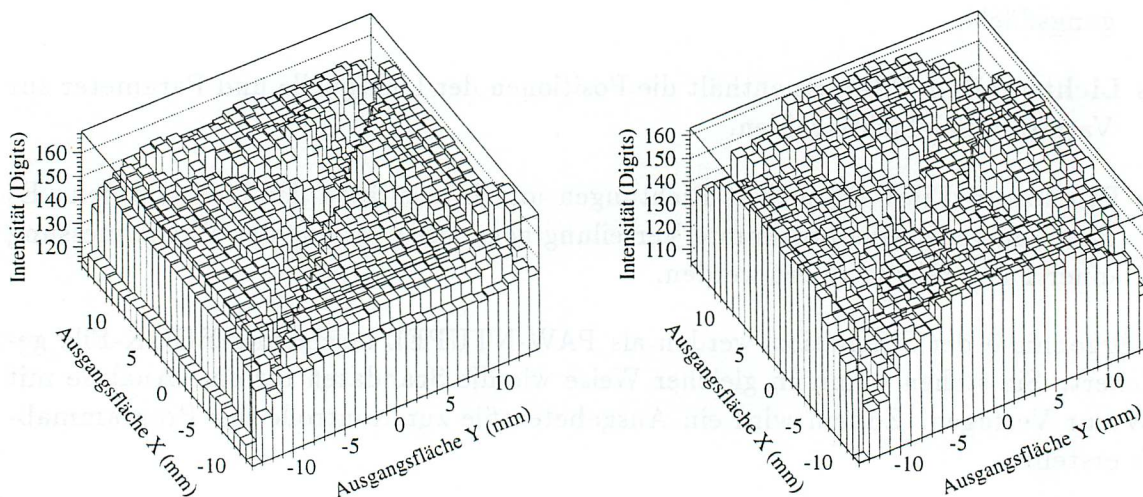


Abbildung 6.1:

- Links: Die gemessene Intensität an der Ausgangsfläche von Lichtmischer 2
 Rechts: Die simulierte Intensität an der Ausgangsfläche von Lichtmischer 2

Dies belegt, daß die Entstehung der Schatten nicht nur durch Lichtverlust in den Kanten, sondern auch auf die Abweichung des realen Lichtwegs vom Weg bei einer perfekten

Ecke, zurückzuführen ist. Diese Abweichung der Wege, ist beim Übergang von einer perfekten Ecke zu einer kleinen 45° Fase zu gering um sich in der Simulation auszuwirken. Damit erscheint es verständlich, daß Simulation 2 kaum von Simulation 1 abwich.

6.2.2 Die komplette Simulation eines Scandurchgangs

Aus der gemessenen Winkelverteilung von Lichtquelle 1 wurde ein Photonenfile generiert und mit diesem von jedem der Lichtmischer 1 – 4 ein kompletter Scandurchgang simuliert. Als Beispiel ist in den Abbildungen 6.2 und 6.3 das Ergebnis von Lichtmischer 3 gezeigt. Es kann direkt mit den Abbildungen 5.4 und 5.9 verglichen werden.

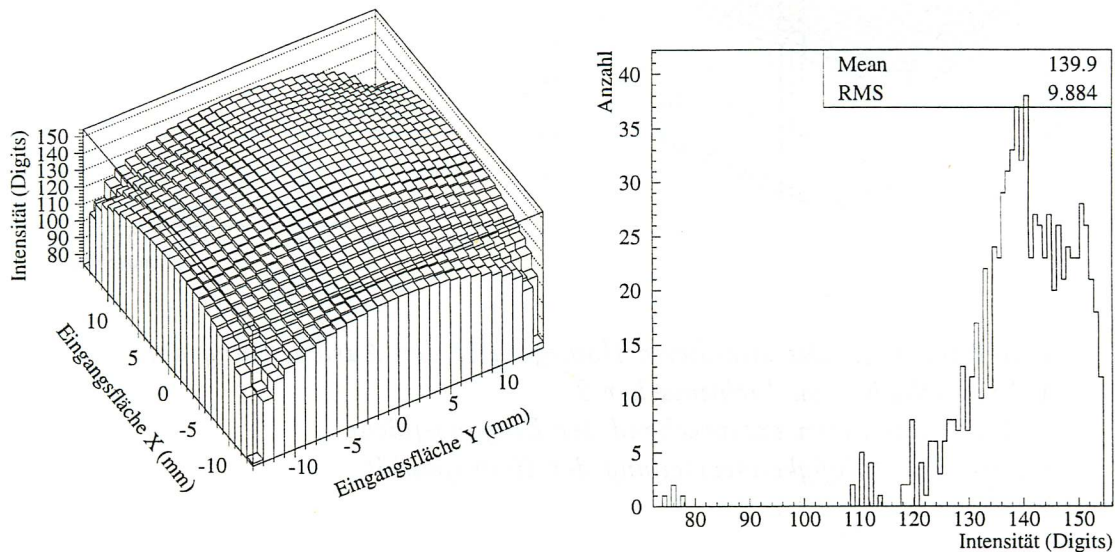


Abbildung 6.2: Die simulierte Intensität an der Ausgangsfläche von Lichtmischer 3

Links: Aufgetragen entsprechend der Eingangsfläche

Rechts: Die Häufigkeitsverteilung der Intensität

Bei der Intensitätsverteilung zeigt die Simulation dasselbe qualitative Verhalten wie die Messung. Die kleinen Werte der vier Bins in den Ecken der Eingangsfläche sind bei der Simulation systematisch bedingt.

Der quantitative Vergleich der Werte zeigt jedoch zu große Abweichungen um präzise Vorhersagen aus der Simulation machen zu können. Beim Vergleich der Homogenitätsplots von Messung und Simulation. Fällt auf, daß in der Simulation das Homogenitätsmaß der Eckbereiche nicht so stark ansteigt wie bei den Messungen. Dies belegt, daß in der Simulation die Beschreibung des Lichtwegs an den Kanten zu vereinfacht gewählt ist. Die Werte von Messung und Simulation sind in Tabelle 6.1 gegenübergestellt.

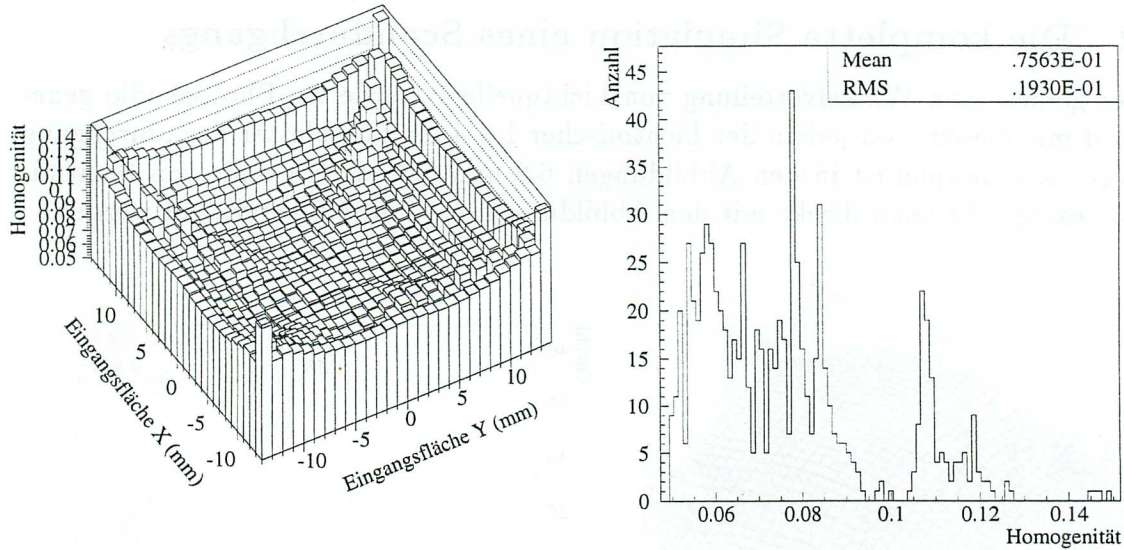


Abbildung 6.3: Die simulierte Homogenität der Ausleuchtung der Ausgangsfläche von Lichtmischer 3
 Links: Aufgetragen entsprechend der Eingangsfläche
 Rechts: Die Häufigkeitsverteilung der Homogenität

	Messung	Simulation
Schwankung der totalen Lichtmenge	4%	7%
Homogenität der Ausgangsfläche	7,5%	9%

Tabelle 6.1: Die Ergebnisse von Messung und Simulation für Lichtmischer 3, mit Lichtquelle 1 und Analyseradius $\geq 7,9$ mm

Kapitel 7

Zusammenfassung

Eine der Erwartungen, die an das im Winter 1994/95 in den H1-Detektor einbaute Faserkalorimeter SPACAL gerichtet sind, ist eine sehr gute Energieauflösung. Damit verbunden ist eine gute Homogenität des Kalorimeters über seine gesamte Fläche. Als Quelle möglicher Inhomogenitäten erwiesen sich die Modulgrenzen und die Inhomogenitäten der einzelnen Photomultiplierkathoden. Dies führte zum Einsatz sogenannter Lichtmischer zwischen den Enden der Faserbündel und den Photomultipliern. Sie sollen das Licht aller Fasern eines Moduls dergestalt zum Photomultiplier weiterleiten, daß dieser innerhalb seines Moduls unsensitiv auf den Entstehungsort des Lichtes wird. Ziel dieser Arbeit war es nun, das Mischungsprinzip verschiedener Lichtmischerformen zu untersuchen und zu bewerten.

Im ersten Teil der Arbeit wurde dazu eine Meßeinrichtung aufgebaut. Sie besteht im Wesentlichen aus einer X-Z-Scantisch zur Positionierung einer Lichtfaser an der Eingangsfläche des Lichtmischer und einer CCD-Kamera zur Messung der Lichtverteilung an der Ausgangsfläche. Vor allem die Verwendung einer Kamera und die damit verbundene Digitalisierung der Bilder ließ eine detaillierte Bewertung der Lichtmischer zu.

Von vereinzelt Störungen bei Übernacht-Messungen abgesehen, deren Ursache nicht sicher festgestellt werden konnte, erwies sich der Meßaufbau für seine Zwecke als sehr geeignet. Im Laufe der Arbeit wurden mit ihm über 3 Giga-Byte Daten genommen. Zudem ermöglichte die Apperatur die genaue Vermessung der Winkelverteilung von Licht, das aus einer Lichtleitfaser austritt. Die dabei gemachten Beobachtungen waren nur zum Teil verständlich und bedürfen einer systematischen Untersuchung. So war eines der Probleme dieser Arbeit, daß beim angewandten Verfahren zum Ankoppeln von Lichtleitfasern an LED's mitunter unbrauchbare asymmetrische Winkelverteilungen entstanden.

Zur systematischen Untersuchung des Verhaltens von Lichtmischern in Form eines Pyramidenstumpfes, wie sie im SPACAL Verwendung fanden, wurden vier Exemplare gefertigt, die sich bei gleicher Länge und Größe des Ausgangsfensters, nur in der Größe ihrer Eingangsfläche und damit im Winkel der Seitenflächen zueinander unterschieden. Aus den Messergebnissen mit zwei Fasern, deren Licht eine unterschiedliche Winkelverteilung aufwies, ergaben sich nachstehene Beobachtungen und Folgerungen.

- Jede von der Eingangsfläche zur Ausgangsfläche verlaufende Kante wirft einen

„Schatten“ auf die Ausgangsfläche. Diese bilden die wesentliche Inhomogenität der Ausleuchtung der Ausgangsfläche.

- Die Inhomogenität an der Ausgangsfläche steigt überproportional an, je näher die Eintrittsposition des Lichtkegels einer Ecke der Eingangsfläche kommt. Als Faustformel für alle vier Lichtmischer gilt, daß sich für die Eckpositionen der Eingangsfläche im verwendeten Maß die doppelte Inhomogenität ergibt.
- In etwa proportional zum Winkel¹ der Seitenflächen zueinander sinkt die absolute Lichtmenge, die von der Eingangsfläche die Ausgangsfläche erreicht. Zudem zeigte sich ein verstärkter Lichtverlust in den Ecken der Eingangsfläche bei Winkeln größer 0° . Diese Intensitätseinbrüche beliefen sich beim Lichtmischer mit dem größten Öffnungswinkelauf auf 75% des Mittelwerts .
- Die Verwendung verschieden großer Kreisbereiche der Ausgangsfläche bei der Analyse der Lichtmischer, entsprechend verschieden großer Photomultiplierkathoden, ergab keinen wesentlichen Effekt bei der Gesamthomogenität der Lichtmischer. Die Gesamtintensität ist der Analysefläche proportional.

Der im Spacal verwendete Lichtmischer wurde mit und ohne eingeklebte Kalibrationsfasern vermessen. Er zeigte eine Gesamtschwankung von 3% + 1%. Dabei stellen die 1% den Anteil der am Rand eingeklebten Fasern dar. An den Rand und Eckbereiche wurden Intensitätseinbrüche bis zu 3,3% und Homogenitätswerte von 10% gemessen. Daraus läßt sich ein maximaler Effekt von 6% an den, in der SPACAL Entwicklungsphase gemessenen Signaleinbrüchen, an den Modulgrenzen abschätzen. Die Faltung der Ausleuchtung der Ausgangsfläche mit einer theoretischen Photomultiplierinhomogenität ergab maximale Schwankungen von nur 3%.

Dies zeigt, daß die in der Arbeit angewandte Methode zur Abschätzung der Gesamthomogenität sehr konservativ ist.

Die untersuchten neuen Lichtmischergeometrien (konvexe Seitenflächen, konkave Seitenflächen, Kegelstumpf mit dreieckiger Grundfläche) ergaben alle schlechtere Eignung als die entsprechende Pyramidenstumpfform. Dabei traten bei den Lichtmischemit gebogenen Seitenflächen so grundlegende Probleme auf, daß es unwahrscheinlich erscheint, besser Lichtmischer in dieser Gestalt zu finden. Die Resultate der dreieckigen Grundfläche gegenüber der quadratischen legen dagegen die Untersuchung von fünf- und mehreckigen Querschnittsflächen nahe.

Mit dem Ansatz, Lichtmischer per Computer zu simulieren, wurden erste qualitative Erfolge erzielt. Eine Vorabuntersuchung von Lichtmischemit per Computersimulation scheint daher möglich und könnte ein wertvolles Instrument zur optimalen Anpassung von Lichtmischemit an gegebene Randbedingungen sein.

Abschließend seien noch einige Richtlinien zur Wahl der Lichtmischergeometrie genannt:

- Nach den bisherigen Erkenntnissen sind Pyramidenstümpfe die geeignetste Form für Lichtmischer.

¹für die vier betrachteten Winkel von 0° zu 22.6°

-
- Die Länge des Lichtmischers sollte so gewählt werden, daß die vom entsprechend langen Lichtkegel beleuchtete Fläche ein mehrfaches der Ausgangsfläche ist. Der Öffnungswinkel von Licht aus einer Faser kann dabei mit ca. 60° angesetzt werden. Allgemein werden Lichtmischer mit zunehmender Länge besser.
 - Der Winkel der Seitenflächen ist der für die Homogenität entscheidende Parameter. Er sollte so klein wie möglich gewählt werden.
 - Wählt man die Ausgangsfläche zugunsten eines kleineren Öffnungswinkels größer als die Photomultiplierkathode, so verliert man, dem Flächenverhältnis entsprechend, Intensität. Diese Effekte sind gegeneinander abzuwägen.
 - Die Eingangsfläche sollte etwas größer als das Faserbündel gewählt werden, damit keine Fasern direkt am äußeren Rand in den Lichtmischer einkoppeln. Dabei ist jedoch die Vergrößerung des Öffnungswinkels des Lichtmischers im Auge zu behalten.

Anhang A

Die Schrittmotorsteuerung

A.1 Allgemeines

Das im Rahmen der Diplomarbeit erstellte Schrittmotorsteuerungsmodul generiert die Steuerungssignale für zwei Isel-Leistungstreiber zur Ansteuerung von je einem Schrittmotor. Dabei bilden diese zwei Motoren eine Einheit und können nicht separat gestartet werden. Die Verbindung zum VME-Bus stellt die Ein-Ausgabe-Grundkarte A 201 von men¹ her.

Das Steuerungsmodul bildet einen aktiven Adapter zwischen diesen Schnittstellen. Es ist vorrangig auf die Anforderungen des Versuchsaufbaus abgestimmt, ermöglicht aber weitgehend alle Positionierungsaufgaben.

A.2 Die Hardware-Umgebung

A.2.1 Die VME-Bus-Interface-Karte A 201

Die A 201 ist eine Modulträgerkarte für universelle Ein-/ Ausgabeanwendungen am VME-Bus. Auf ihr sind vier Module über einen 40-poligen Sockelverbinder aufsteckbar. Zudem steht jedem Modul ein Interrupter zur Verfügung.

Die Adressleitungen A01 — A07 und die beiden Datastrobeleitungen sind zum Sockelverbinder durchgeführt. Damit kann jedes Modul einen Adressraum von 0\$100 dekodieren. Die restlichen Adressleitungen werden von der A201 dekodiert und jedem Modul über eine Chip-Select-Leitung ein 0\$100 großer Bereich zugeteilt. Mit dem darauf folgenden 0\$100 großen Bereich wird der zum Modul gehörende Interrupter angesprochen. Die ergibt einen Adressoffset zwischen den Modulen von jeweils 0\$200. In dieser Art wird von der A 201 ein 0\$800 großer Speicherbereich vordekodiert und auf die Module und den zugehörigen Interrupter verteilt. Die Basisadresse eines Moduls ergibt sich nach folgender Formel:

$$\text{Modulbasisadresse} = \text{A201-Basisadresse} + \text{Modulnummer} \times 0\$200$$

Der 16 Bit breite VME-Datenbus, sowie die Leitungen WRITE, DTACK, IRQ, IACK, RESET, SYSCLK, GND, +5 V, +12 V, -12 V belegen die restlichen Kontakte des

¹Microelektronik GmbH Nürnberg

Sockelverbinders.

Der Interrupt-Controller MS68C153 dient zur unabhängigen Verwaltung von vier Interruptquellen, die den vier Steckplätzen zugeordnet sind. Er unterstützt alle für das VME-Interruptprotokoll verwendeten Signale. Für jede Interruptquelle wird sein Verhalten vom jeweiligen Kontrollregister und Vektorregister bestimmt. Sie haben einen Adressoffset von 0\$101 (Kontrollregister) bzw. 0\$103 (Vektorregister) zur Modulbasisadresse. Ihre genaue Funktion kann im Manual der A 210 [Men 89] nachgelesen werden. Zu beachten ist, daß die Erläuterungen von Bit 3 und 4 des Kontrollregisters vertauscht wurden. Ebenfalls ist die Anschlußbelegung des 96-poligen VME-Bus-Steckers P1 fehlerhaft.

A.2.2 Die Isel-Schrittmotor-Leistungskarte

Die Isel-Schrittmotor-Leistungskarte vereinigt ein 80 Watt Netzteil, Signalwandlung und Leistungsendstufe auf einer Euro-Karte mit 2 Zoll Frontplatte. Als Endstufe dient eine bipolare, getaktete Stromquelle mit einer Chopperfrequenz von 20 kHz. Der maximale Strom läßt sich über ein Potentiometer in der Frontplatte auf maximal 2 A einstellen.

Die Verbindung zum Motor stellt ein 9-poliger Sub-D-Buchsenstecker dar, über den auch die Endschaltersignale übertragen werden können.

Der Eingang einer Endstufe ist als 16-polige Messerleiste ausgeführt. Die beiden Leistungskarten befinden sich in einem speziellen Einschubgehäuse das 3 solche Leistungskarten und eine 2 Zoll breite Steuerkarte aufnehmen kann. Dabei sind die Eingangsstecker der drei Endstufen über eine Backplane im Gehäuse mit einer 64-poligen Steckerleiste am Einschubplatz der Steuerkarte, entsprechend Tabelle A.1 verbunden. Die Bedeutung der Signale kann nachgelesen werden in [Ise 88]. Die dort sitzende Adapterkarte (Abbildung A.1) trägt einen Sub-D-25 Stecker zur Verbindung mit dem Steuermodul und einen 5-poligen Hirschmann-Stecker als Zusatzverbindung zum Fahrtisch für die Endschalter. Diese wurde nötig, da es in den Verbindungen von Leistungstreiber und Motor zum Übersprechen zwischen den mit 20 kHz getakteten Motorleitungen und den Steuerleitungen kam.

Die Anschlußbelegungen kann man den Tabellen A.2 und A.3 entnehmen. Auf der Adapterkarte befindet sich ein 4-fach-DIL-Schalter mit folgenden Funktionen:

1. Status-LED's an / aus.
2. Verbindet Pin 19 und 20 des Sub-D Steckers mit +5 Volt vom Isel-Crate. Dies wird zum Handbetrieb der Steuerung ohne die A 201 benötigt, siehe: 4.1.
3. verbindet ein weiteres Signal mit dem Sub-D-Stecker, und steht damit auf dem Steuerungsmodul zur Verfügung. Dies wurde z.B. genutzt um weitere Interrupts auszulösen.
4. entsprechend Schalter 3.

Kontakt	Slot	Signal	Kontakt	Slot	Signal
A 7	1	Halb-/Vollschritt	C 7	—	nicht benutzt
A 8	3	Halb-/Vollschritt	C 8	2	Halb- Vollschritt
A 9	2	Referenztaster	C 9	1	Referenztaster
A 10	—	nicht benutzt	C 10	3	Referenztaster
A 11	1	Taktabschaltung	C 11	2	Taktabschaltung
A 12	3	Taktabschaltung	C 12	—	nicht benutzt
A 16	—	nicht benutzt	C 16	1	Richtung
A 17	1	Takt	C 17	3	Richtung
A 18	3	Takt	C 18	2	Richtung
A 19	2	Takt	C 19	—	nicht benutzt
A 20	3	Stromabsenkung	C 20	2	Stromabsenkung
A 21	1	Stromabsenkung	C 21	—	nicht benutzt
A 25	3	Überfahrschalter	C 25	2	Überfahrschalter
A 26	1	Überfahrschalter	C 26	3	Endstufenabschaltung
A 27	1	Endstufenabschaltung	C 27	1	Endstufenabschaltung
A 30	—	+ 5 Volt	C 30	—	+ 5 Volt
A 32	—	GND	C 3	—	GND

Tabelle A.1: Die Kontaktbelegung des Backplanesteckers des Einschubmoduls

Motor A	Signal	Motor B	Motor A	Signal	Motor B
1	Takt	13	14	GND	25
2	Taktabschaltung	15	15	GND	24
3	Motoren langsam	16	16	GND	23
4	Richtung	10	17	Voll-/Halbschritt	22
5	Stromabsenkung	8	18	Position gefunden	21
6	Endschalter	8	19	+5 Volt	20
7	Busy	7			

Tabelle A.2: Die Kontaktbelegung des SUB-D-25-Steckers zwischen Steuerungsmodul und Einschubplatine

Kontakt	Signal
1	+ 5 Volt
2	Endschalter
3	GND
4	Endschalter
5	Notaus (Enstufenabschaltung)

Tabelle A.3: Die Kontaktbelegung des 5-poligen Zusatzsteckers

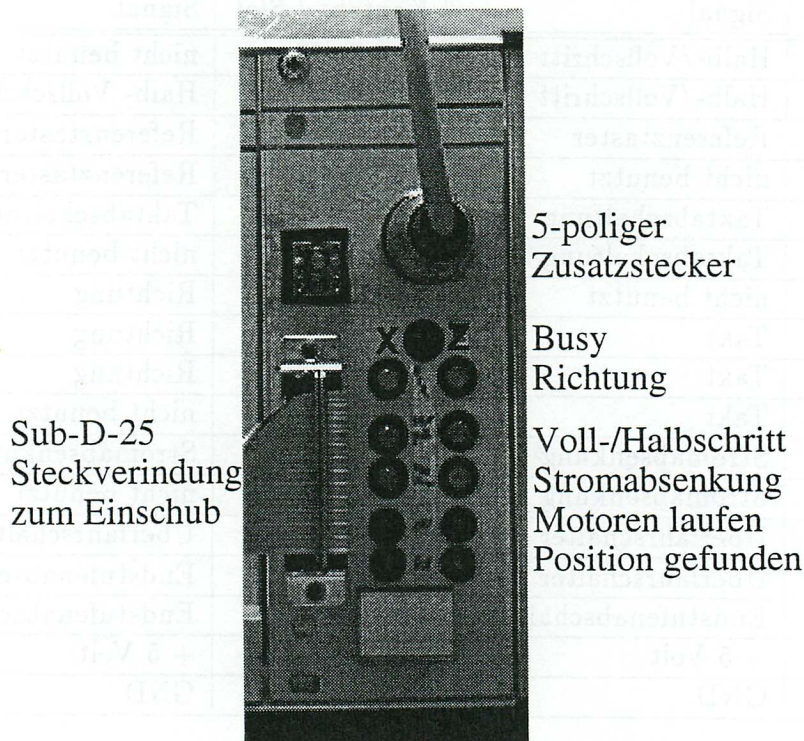


Abbildung A.1: Die Einschubkarte für das Isel-Crate, in dem sich die beiden Leistungskarten befinden.

A.2.3 Die Arbeitsweise

Die Arbeitsweise des Moduls beruht darauf, den Wagen um definierte Distanzen zu bewegen. Dies stellt einen Kompromiß, zwischen einem passiven Adapter und einer „intelligenten Steuerung“ dar, die die Kontrolle über die absoluten Positionen behält. Die Distanzen werden vom Steuerprogramm in das Modul geladen. Nach dem Starten der Motoren generiert das Modul für jeden Motor die entsprechende Anzahl von Takten. Nachdem beide Motoren die Zielposition oder den Endschalter erreicht haben, ist das Modul wieder bereit. Dies kann dem Steuerprogramm über den Interrupter der A 201 mitgeteilt werden. Die Kontrolle über die absolute Position liegt beim Steuerprogramm.

Wenn ein Wagen den Endschalter schließt, stoppt das Taktsignal des jeweiligen Motors. Nach einer kurzen Wartezeit zum vollständigen Abbremsen, wechselt die Steuerung die Richtung und bewegt den Wagen langsam aus dem Endschalter. Erst wenn der Endschalter wieder öffnet, bleibt der Motor stehen. Durch dieses Verfahren, bleibt der Wagen, der den Endschalter bei beliebiger Geschwindigkeit erreicht hat mit hoher Wiederholgenauigkeit an einem definierten Punkt stehen.

Allerdings ist dazu ein Endschalter mit Schalthysterese und ausreichend genau definiertem Ausschaltpunkt notwendig. Ebenso muß hinter dem Endschalter noch genügend Platz zum „ausrollen“ des Wagens zur Verfügung stehen.

A.2.4 Die Ansteuerung

Zur Steuerung des Moduls stehen folgende 4, 16-Bit breite Register zur Verfügung, die vom VME-Bus im Word-Format adressiert werden müssen:

- Basisadresse + 0\$00: Zähler für X-Motor
- Basisadresse + 0\$02: Zähler für Z-Motor
- Basisadresse + 0\$04: Statusregister
- Basisadresse + 0\$06: Startregister

Die Basisadresse des Moduls ergibt sich aus seinem Steckplatz und der Basisadresse der A 201. Da nur die unteren drei Adressleitungen dekodiert werden, spiegeln sich diese 4 Adressregister 64 mal im 256 Bit breiten Adressbereich.

Das Startregister

Ein Schreib- oder Lesezugriff auf das Startregister startet beide Motoren und versetzt das Modul in den Busy-Status. Die bedeutet, daß auf die beiden Zähler und das Statusregister nur noch Lesezugriffe möglich sind. Schreibzugriffe werden vom Modul quittiert, so daß kein Bus-Error ausgelöst wird, die Daten jedoch nicht übernommen. Dadurch werden mechanisch unmögliche Befehle, wie plötzliche Richtungsänderungen bei voller Fahrt verhindert. Sind beide Motoren nach Erreichen der Zielposition oder der Endschalter zum Stillstand gekommen, verläßt das Modul wieder den Busy-Status und kann mit neuen Steuerungsdaten geladen werden.

Die Zähler

In die Zähler wird für jeden Motor in codierter Form die Anzahl der Schritte beim nächsten Start geladen. Aus schaltungstechnischen Gründen sind die Zähler als Vorwärtszähler zum Wert $X = 0\$FF00$ ausgelgt. Deshalb muß für die gewünschte Schrittzahl N der jeweilige Zähler mit dem Wert $X = 0\$FF00 - N$ geladen werden. Dies ermöglicht einen maximalen Verfahrensweg von $0\$FF00 = 65280$ Schritten. Der Zählerstand Z kann, während die Motoren laufen ausgelesen und aus der Differenz $0\$FF00 - Z$ die aktuelle Position bestimmt werden. Bei erneutem Starten der Motoren ohne Neuinitialisierung des Zählers wird wieder um die zuletzt programmierte Schrittzahl verfahren. Allerdings ist es nicht möglich, diese Schrittzahl aus dem Zähler auszulesen, daher muß sie vom Programm gespeichert werden. Ebenso ist die Positionsrekonstruktion über den Zähler ungültig, sobald der Wagen einen Endschalter erreicht, da die Takte während des Abbremsens und Zurückfahrens des Wagens mitgezählt werden.

Das Statusregister

Das Statusregister dient einerseits dem Festlegen von Richtung, Voll-/ Halbschrittbetrieb und Motorleistung und andererseits zum Abfragen des Betriebsstatus. Dabei haben die einzelnen Bits folgende Bedeutung:

- Bit 00:** Drehrichtung des X-Motors.
0 → im Uhrzeigersinn
1 → gegen den Uhrzeigersinn
- Bit 01:** Betriebsart des X-Motors
0 → Vollschrittbetrieb
1 → Halbschrittbetrieb
- Bit 02:** Einstellung des X-Motor-Stromes
0 → maximaler Strom
1 → gesenkter Strom
- Bit 03:** „Position gefunden“ Flag des X-Motors
0 → Wagen hat den Endschalter erreicht
1 → Wagen hat die Zielposition erreicht
- Bit 04:** Drehrichtung des Z-Motors.
0 → im Uhrzeigersinn
1 → gegen den Uhrzeigersinn
- Bit 05:** Betriebsart des Z-Motors
0 → Vollschrittbetrieb
1 → Halbschrittbetrieb
- Bit 06:** Einstellung des Z-Motor-Stromes
0 → maximaler Strom
1 → gesenkter Strom
- Bit 07:** „Position gefunden“ Flag des Z-Motors
0 → Wagen hat den Endschalter erreicht
1 → Wagen hat die Zielposition erreicht
- Bit 08:** Interrupt-Request-Flag
0 → kein Interrupt vom Modul
1 → Modul hat Interrupt ausgelöst
- Bit 09:** Modul Status Flag
0 → Modul im Not-Busy Status
1 → Modul im Busy-Status

Das Statusregister kann jederzeit vom Steuerprogramm ausgelesen werden. Gesetzt werden können nur die Bits 00 - 02 und 04 - 06 während sich das Modul im Not-Busy-Status befindet; also die Motoren nicht laufen und Bit 9 des Statusregisters 0 ist.

A.3 Die Hardware

A.3.1 Das Steuerungsmodul

Das Modul wurde auf engstem Raum aus den folgenden integrierten Schaltkreisen in Wickeltechnik aufgebaut.

4 × 74593: 8-Bit-Zähler als Schrittzähler.

2 × 74245: 8-Bit bidirektionale Bustreiber.

- 1 × Am 29C827A: 10-Bit Bustreiber für das Statusregister.
- 4 × GAL 20 V 8: Programmierbare Logik Gatter zum Aufbau der Steuerlogik.
- 2 × 7430: 8-fach NAND-Gatter zum detektieren des Abbremssignals.
- 1 × 7408: 4 AND-Gatter zum Steuern der Taktfrequenz
- 1 × 7414: 4 NAND-Schmitt-Trigger zum Signalformung
- 2 × MC 14046: Phase-Locked-Loop als Spannungsabhängige Oszillatoren.

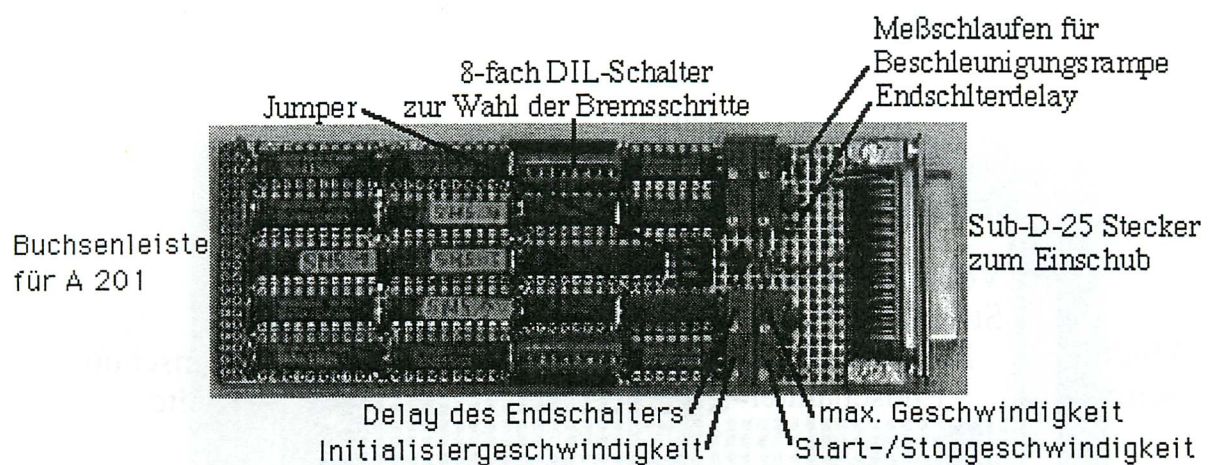


Abbildung A.2: *Das Aufsteckmodul zur Steuerung der Schrittmotoren*

A.3.2 Die Zusatzplatine

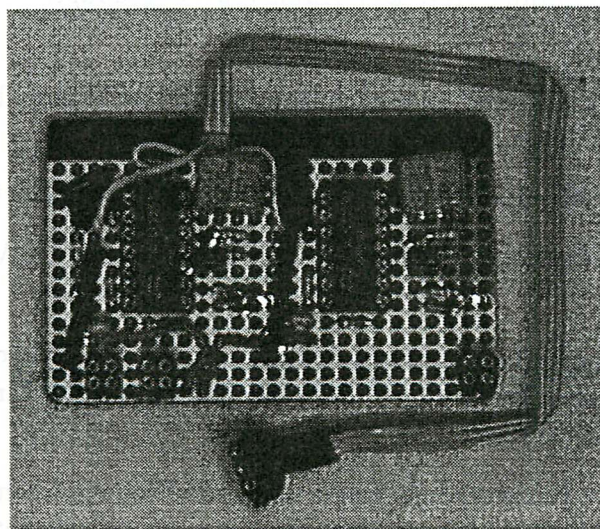


Abbildung A.3: *Die Zusatzplatine für weitere Interruptquellen.*

Zur Messung der Schrittverluste wurde, auf das Signal eines Überfahrschalters hin, die aktuelle Position des Fahrtisches ausgelesen. Dazu mußte dem Tisch für jede Achse eine weitere Interruptmöglichkeit zur Verfügung gestellt werden. Dies wurde mit einer Zusatzplatine erreicht, die neben dem Steuerungsmodul auf zwei benachbarten Steckplätze der A 201 Platz fand. Mit ihr ließen sich die beiden, diesen Steckplätzen zugeordneten, Interrupts auslösen. Als Eingang für die Zusatzplatine dienen zwei Leitungen des 25-poligen-Sub-D-Steckers, die sonst nur von der Handsteuerung benutzt werden. Dazu wird der Stecker der Zusatzplatine auf die, während des Modulbetriebs freie, Stiftleiste der Jumper gesteckt. Damit ist der Interrupter mit den Kontakten 3 und 4 des 4-fach-DIL-Schalters im Einschubmodul verbunden.

A.3.3 Die Einstellung der Betriebsparameter mit der Handsteuerung

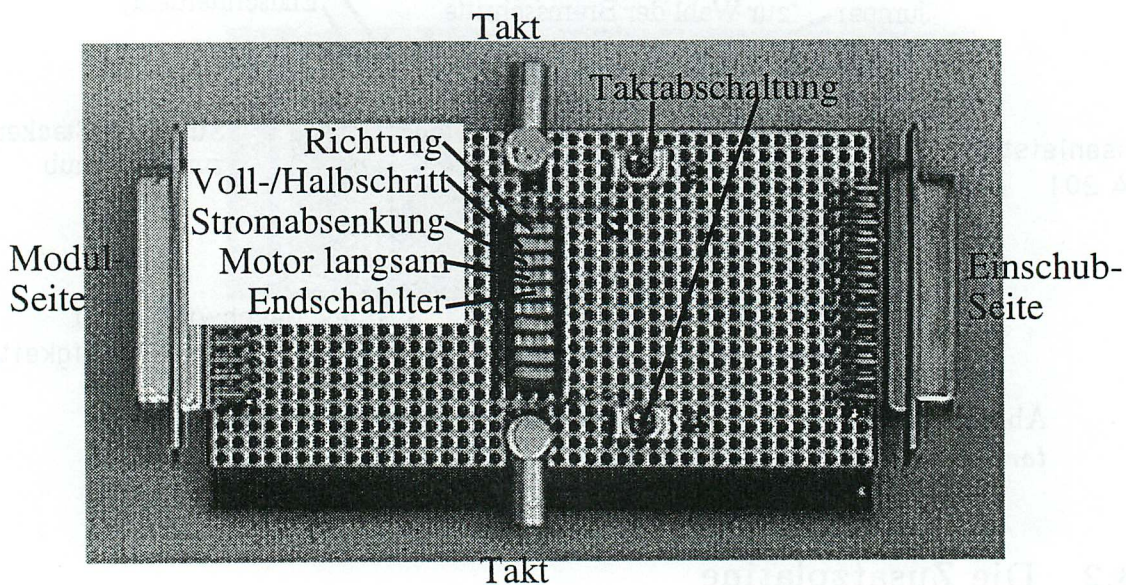


Abbildung A.4: Der Handsteuerungsadapter

Mit Hilfe der vier Potentiometer und dem 8-fach-DIL-Schalter lassen sich folgende 5 Betriebsparameter für jeden Motor getrennt einstellen.

maximale Verfahrgeschwindigkeit: Einstellbar bis 10 000 Hertz

Start-/Stopgeschwindigkeit: Einstellbar von 0 bis maximale Verfahrgeschwindigkeit.

Initialisierungsgeschwindigkeit: Geschwindigkeit, mit der ein Wagen zur Positionsinitialisierung aus dem Endschalter herausgefahren wird. Einstellbar von 0 bis Start-/Stopgeschwindigkeit.

Beschleunigungszeit: In dieser Zeit steigert sich die Frequenz von der Startgeschwindigkeit zur maximalen Verfahrgeschwindigkeit und umgekehrt. Einstellbar von 0 bis 1 s.

Bremsweg: Anzahl der Schritte vor Erreichen der Zielposition, von der ab die Verfahrgeschwindigkeit auf die Stopgeschwindigkeit gesenkt wird. Einstellbar in 8 Stufen.

Spulenstrom: Einstellbar an der ISEL-Schrittmotorleistungskarte von 0 – 2 *Ampère*.

Zum Einstellen dieser Betriebsparameter wurde ein Handsteuerungsadapter gebaut, der den Betrieb des Fahrtisches ohne Rechner erlaubt (Abbildung A.4). Er ist spiegelsymmetrisch aufgebaut. Die rechte Seite bedient den X-Motor, die linke Seite den Z-Motor. Auf der Steuerung befindet sich ein 10-fach-DIL-Schalter, dessen Funktionen für einen Motor der Abbildung A.4 entnommen werden können. Dazu kommt pro Motor ein Start-/Stopschalter und eine Lemo Buchse, an der das Taktsignal abgenommen werden kann. Zum Betrieb der Handsteuerung muß sie zwischen die Adapterkarte im Isel-Crate und das Steuerungsmodul gesteckt werden. Dazu nimmt man das Modul von der A 201 ab verbindet es mit der Handsteuerung. Diese Einheit kann dann mit dem Verbindungskabel an den Einschub im Isel-Crate angeschlossen werden. So läßt sich der Fahrtisch bequem steuern und die Potentiometer sind zum Einstellen zugänglich. Weiterhin muß der DIL-Schalter 2 des Adapter-Einschubs geschlossen werden, um das, von der A 201 getrennte, Steuerungsmodul mit Spannung zu versorgen. Abschließend müssen die vier Jumper auf dem Steuerungsmodul umgesteckt werden. Es ist allerdings zu beachten, daß das Modul bei Handsteuerung die Endschalter nicht beachtet und zum Anfahren bzw. Bremsen nicht automatisch auf Start-/Stopgeschwindigkeit geschaltet wird.

Einstellung der Parameter nach folgenden Schritten:

- Steuerungsmodul von der A 201 nehmen.
- Alle vier Jumper umstecken in Richtung des Sub-D-Steckers.
- DIL-Schalter 2 auf Adaptereinschub schließen.
- Handsteuerung und Steuerungsmodul zusammenstecken und mit dem Adaptereinschub verbinden.
- Die drei Verfahrgeschwindigkeiten des Motors werden nun mit den DIL-Schaltern: „Motor langsam“ und „Endschalter“ entsprechend Tabelle A.4 eingestellt. In der Reihenfolge maximale Verfahrgeschwindigkeit, Start-/Stop-Geschwindigkeit, Initialisierungsgeschwindigkeit werden nun mit Hilfe der Potentiometer auf dem Steuermodul die Frequenzen des Oszillators eingestellt. Dabei hat der Bediener dafür Sorge zu tragen, daß die Motoren nicht bei zu großen Frequenzen gestartet werden.
Dieser Schritt wird solange wiederholt, bis alle drei Geschwindigkeiten den gewünschten Werten genau genug entsprechen.
- Die Beschleunigungsrampe wird am entsprechenden Potentiometer der Steuerkarte eingestellt. Sie kann durch Umschalten von Start-/Stopgeschwindigkeit zu maximaler Geschwindigkeit (DIL-Schalter 4 und 7) durchfahren und an der Meßschleife auf dem Steuerungsmodul per Oszilloskop beobachtet werden.

Endschalter	Motor langsam	Geschwindigkeit
off	off	Initialisierungsgeschwindigkeit
on	off	Initialisierungsgeschwindigkeit
on	on	Start-/Stopgeschwindigkeit
off	on	maximale Geschwindigkeit

Tabelle A.4: Die Einstellung der Geschwindigkeit auf der Handsteuerplatine.

1	2	3	4	5	6	7	8	Anzahl der Schritte zum Bremsen
on	on	on	on	on	on	on	on	0
off	on	on	on	on	on	on	on	256
off	off	on	on	on	on	on	on	768
off	off	off	on	on	on	on	on	1792
off	off	off	off	on	on	on	on	3840
off	off	off	off	off	on	on	on	7936
off	off	off	off	off	off	on	on	16128
off	off	off	off	off	off	off	on	32512
off	off	off	off	off	off	off	off	Motor immer langsam

Tabelle A.5: Die Tabelle zum Einstellen des Bremswegs.
Je nach Schalterstellung wird der Motor die angegebene Zahl von Schritten vor Erreichen der Zielposition abgebremst.

- Entsprechend wird die Delayzeit des Endschaltersignals durch Umschalten der Endschaltersignalleger (DIL 5 und 6) eingestellt. Das verzögerte Signal kann an der Meßchlaufe auf dem Steuermodul abgegriffen werden.
- nach dem Einstellen dieser Parameter kann die Handsteuerung wieder vom Modul getrennt und die Jumper und DIL-Schalter 2 wieder in Ausgangsstellung gebracht werden.
- Vor dem Einsetzen des Moduls in den VME-Bus wird aus maximaler Geschwindigkeit, Start-/Stopgeschwindigkeit und Beschleunigungszeit die Schrittzahl des Bremsvorgangs abgeschätzt und entsprechend Tabelle A.5 an den DIL-Schaltern des Moduls eingestellt.

Bei der Einstellung der Betriebsparameter kann es vorkommen, daß das Modul die Motoren nicht mehr beschleunigt. In diesem Fall muß die Stromversorgung des Moduls kurz unterbrochen werden.

A.4 Der Device-Driver

Für das Steuerungsmodul wurde ein eigener Device-Driver mit zugehörigem Device-Descriptor programmiert, da nur so eine korrekte Interruptabwicklung möglich ist. Der Device-Driver unterstützt dabei die Routinen „init“ und „term“ zum Initialisieren und Beenden der Steuerung, sowie „read“ und „write“ zum Datenaustausch. Da zur Begrenzung des Programmieraufwands der Sequential-Character-File-Manager benutzt wurde, im Modul jedoch vier 16-Bit Adressen angesprochen werden müssen, hat das steuernde C-Programm folgende Sequenzen beim Lesen bzw. Schreiben streng einzuhalten: Zuerst wird das Zielregister 0-2 als 1 Byte Wert dem Device-Driver übermittelt, danach können 2 Byte in das damit spezifizierte Register geschrieben oder ausgelesen werden. Wird diese starre Reihenfolge unterbrochen, wird der nächsten Zugriff auf das Modul einen Fehler auslösen. Es empfiehlt sich daher, im Steuerprogramm den „Adress-Schreibvorgang“ mit dem folgenden 2-Byte Schreib oder Lesevorgang jeweils in einer Routine zu verbinden. Das anwählen der Adresse 3 über den Device-Driver startet die Motoren direkt. Das heißt, nach der „Adresse 3“ muß gleich wieder eine Adresse angewählt werden, ohne dazwischen 2 Byte Daten zu übertragen.

Anhang B

Das Programmpaket zur Datennahme

B.1 Das Programm „ccdtool“

Alle Aufnahmen und Messungen der Diplomarbeit wurden mit dem Programm „ccdtool“ gemacht. Es wurde unter dem Betriebssystem OS 9 geschrieben und besteht aus den drei „C“-Programm-Modulen „ccdtool.c“, „ccdmod.c“ und „smsmod.c“ sowie den beiden Assablerroutinen „readpic.a“ und „fastreadpic.a“. Zudem greift das Programm auf die IPP-Library von ELTEC [Els 91] und den Device-Driver des Scantisches zurück. Zum Compilieren und Linken dieser Programmteile wurde ein makefile erstellt. Die strenge Aufteilung von Hauptprogramm, Kamerasteuerung, Schrittmotorsteuerung in die Module „ccdtool.c“, „ccdmod.c“ und „smsmod.c“ konnte leider nicht ganz durchgehalten werden.

B.1.1 Der Programmaufruf

Das Programm wird gestartet mit seinem Namen „ccdtool“. Ihm können die Optionen -m, -i und der Name eines Setupfiles in beliebiger Reihenfolge angehängt werden.

-m: die Bedienung des Scantisches wird unterbunden. Somit läßt sich das Programm bei fehlendem Schrittmotorsteuerungsmodul benutzen.

-i: initialisiert die Motoren beim Programmstart. Das bedeutet, daß sich der Fahrtisch zu den Endschaltern oben und links bewegt. Daher sollte vor dem Starten des Programms mit der Option -i kontrolliert werden, ob der Weg frei ist.

Name eines Set-Up-Files: initialisiert die Kamera entsprechend dem angegebenen Set-Up-File. Dabei wird vom Programm das Suffix „.sup“ an den Filenamen angehängt.

Wird kein Name angegeben, wird die Kamera entsprechend dem File „last.sup“ initialisiert, das die Einstellung beim letzten Verlassen des Programms beinhaltet. Ist weder das angegebene Set-Up-File noch „last.sup“ vorhanden, wird eine Default-Initialisierung vorgenommen.

Wird das Programm mit beiden Optionen -m und -i gestartet, ist die zuletzt gegebene Option entscheidend.

B.1.2 Der Bildschirmaufbau

Die erste Hälfte der oberen Bildschirmzeile dient als Statusanzeige der X-Achse, ihre zweite Hälfte als Statusanzeige der Z-Achse des Fahrtisches. Sie beinhalten jeweils die Position des Fahrtisches vom Initialisierungspunkt in mm. Die Zeichen „> > >“, „< < <“ bzw. „∨ ∨ ∨“, „^ ^ ^“ zeigen die jeweilige Motorbewegung an. Das Zeichen „? ? ?“ zeigt, daß der jeweilige Motor nicht initialisiert ist (z. B. nach Erreichen eines Endschalters). Nach der Position wird angezeigt, ob VOLL- oder HALB-Schrittbetrieb eingestellt ist. Ihr folgt die Anzeige der Motorstromeinstellung mit LOW, HIGH oder AUTO.

Die zweite Bildschirmzeile ist die Statusanzeige der IPP-Karte. Sie zeigt zuerst den Namen des zuletzt gelesenen Setupfiles. Danach die X- und Y-Koordinaten des linken oberen Ecks des Augnahmefensters, gefolgt von seiner Breite in X- und Y-Richtung. Daran schließt sich die Angabe des verwendeten Speicherbereichs der IPP-Karte (PLANE0 / PLANE1) und des Aufnamemodus (LIVE / SNAP) an. Die letzten beiden Einstellungen werden von mehreren Funktionen des Programms beeinflusst. Die unteren beiden Zeilen dienen dem Programm zur Ausgabe von Text. Dieser bleibt stehen, bis er von neuem Text überschrieben wird. Daher kann es passieren, daß veraltete (Fehler-)Meldungen auf dem Schirm stehen bleiben. Der dazwischen liegende Bildschirmbereich beinhaltet das Benutzermenü oder das Programm fordert zu bestimmten Eingaben auf. Um die Cursortasten zum Verstellen des Aufnahme Fensters, bzw. zum Verfahren des Scantisches benutzen zu können, müssen folgende Escapesequenzen zusätzlich im Terminal-Setup programmiert werden:

SHIFT-↑ : ESC [E
SHIFT-↓ : ESC [F

SHIFT-→ : ESC [G
SHIFT-← : ESC [H

B.1.3 Das Hauptmenü

Die meisten Möglichkeiten, die das Menü bietet, erklären sich, ebenso wie die Eingabeaufforderungen, von selbst. Die Auswahl eines Menubefehls erfolgt entweder durch Auswählen mit den Cursor-Tasten und Bestätigen mit der Return-Taste oder durch Drücken des dem Befehl voranstehenden Buchstabens.

Live / Standbild: Umschalten zwischen Livemode und Standbild.

Plane 0 / Plane 1 : Umschalten zwischen den zwei Bildspeichern der IPP-Karte.

Bildausschnitt: Verändert die Lage und Größe des Aufnahme Fensters. Änderungen der Ausschnittgröße sind nur in Schritten von vier Pixeln möglich. Der Ursprung des Fensters lässt sich ebenfalls nur in Schritten von vier Pixeln verändern. Als Y-Koordinate des Ursprungs läßt sich jedoch jede Zeilennummer eingeben.

Lies Set-Up-File ein: Die IPP wird entsprechend dem nachfolgend einzugegebenen Setupfile initialisiert. Die Syntax des Setupfiles entspricht den Angaben im ELTEC-IPP-Softwaremanual [Els 91]. Der Filename muß auf das Suffix „.sup“ enden, welches von Programm immer an den eingegebenen Namen angehängt wird.

Speichere momentane Einstellung in ein Set-Up-File: Dem nachfolgend einzugebenden Filenamen wird das Suffix „.sup“ angehängt und die Einstellung entsprechend dem ELTEC-IPP-Softwaremanual abgespeichert.

Zeige Bild und Fehlerbild auf dem Monitor: Die IPP-Karte wird auf Standbild geschaltet und der Bildspeicher Plane 0 gewählt. Dann wird das aktuelle Bild auf Plane 0 und, wenn vorhanden, das Bild der Standartabweichungen auf Plane 1 geschrieben.

Aufname: Startet das Aufnahmemenu.

Bild Speichern: Speichert wahlweise das aktuelle Bild und sein Fehlerbild auf die Platte. Bilder bekommen das Suffix „.pic“, die Fehlerbilder das Suffix „.err“ angehängt. Die Größe P in Byte der Files beträgt je Bild:

$$P = \text{Höhe des Aufnahme Fensters} \times \text{Breite des Aufnahme Fensters} + 128$$

Punktmessung: Startet das Punktmessungsmenu.

Motorsteuerung: Startet das Motorsteuerungsmenu

Programm beenden: Speichert die momentane Einstellung der Kamera im File „last.sup“ und beendet das Programm.

B.1.4 Das Aufnahmemenu

Mit den Funktionen des Aufnahmemenus wird ein Bild von der Kamera eingelesen. Auf dieses Bild beziehen sich alle weiteren Aktionen, wie Anzeigen oder Abspeichern. Sobald das Aufnahmemenu gewählt wird, geht das zuletzt eingelesene Bild verloren.

Bild aufnehmen: Mittelt eine einzugebende Anzahl von Einzelaufnahmen. Die Mittelwerte ergeben das aktuelle Bild.

Bild und „Bild der Standartabweichung“ aufnehmen: Berechnet von einer einzugebenden Zahl von Einzelaufnahmen Mittelwert und Standartabweichung jedes Pixels. Erstere ergibt das aktuelle Bild. Die Werte der Standartabweichungen werden mit 10 multipliziert und als „Fehlerbild“ gespeichert. Da diese Funktion einen großen Bereich als Zwischenspeicher benötigt, ist die maximale Bildgröße beschränkt.

maximale Bildhelligkeit: Zur Ermittlung des maximalen Helligkeitswertes des zuvor aufgenommenen aktuellen Bildes.

Bildkorrektur: Die Bildhelligkeit wird so skaliert, daß der hellste Punkt einen einzugebenden Wert aufweist.

Abstand eingeben: Der eingegebene Abstand (in $1/100 \text{ mm}$) wird in den Pictureheader geschrieben. Dieser Wert wird benötigt zur Winkelrekonstruktion beim Generieren des Photonenfiles für das Simulationsprogramm.

Zurück zum Hauptmenu

B.1.5 Das Punktmessungsmenu

Das Punktmessungsmenu dient zum Aufnehmen von Messreihen der Intensität eines Bildpunktes mit der maximalen Größe von 16×16 Pixel. Mit ihnen wurde z. B. die Linearitätskurve der Kamera vermessen.

Bei seinem Aufruf legt es ein Ausgabefile an, dessen Name vom Benutzer eingegeben wird. Als nächstes fragt das Programm nach Anzahl und Namen der Parameter, die im Ausgabefile erscheinen sollen.

Die untere Bildschirmzeile dient als Statusanzeige der Punktmessungsfunktion. Es zeigt von links nach rechts folgende Parameter an:

X: X-Position des Bildpunktes relativ zum Bildursprung

Y: Y-Position des Bildpunktes relativ zum Bildursprung

dX: Breite des Bildpunktes in X-Richtung

dY: Breite des Bildpunktes in Y-Richtung

Sanz: Anzahl der Einzelmessungen

#: laufende Nummer der Einzelmessung

Panz: Anzahl der Parameter

[Name] Name und Wert des ersten Parameters

Wert: Ergebnis der letzten Intensitätsmessung

EP: Standardabweichung der $dX \times dY$ Pixel

EA: mittlere Standardabweichung der einzelnen Pixel aus den Einzelmessungen.

Zum Aufnehmen einer Meßreihe stehen die folgenden Funktionen zur Verfügung:

Live / Standbild: Umschalten zwischen Livemode und Standbild.

Plane 0 / Plane 1 : Umschalten zwischen den zwei Bildspeichern der IPP-Karte.

Punktgröße: Wählt die Punktgröße von 1×1 Pixel bis 16×16 Pixel.

Punktposition: Positioniert den Punkt im Bild relativ zum Bildursprung.

Punkt anzeigen: Zeichnet den spezifizierten Punkt in das aktuelle Bild. Dazu wird zum Aufnahmemodus „Standbild“ umgeschaltet.

B.1.6 Das Motorsteuerungsmenu

Das Motorsteuerungsmenu beinhaltet alle Funktionen zum Einstellen des Motorbetriebsmodus, zum Verfahren des Scantisches und zum Abscannen der Lichtmischer.

Motoren initialisieren: Bevor der Scantisch verfahren oder ein Lichtmischerscan gestartet werden kann, muß der Scantisch initialisiert werden. Der Tisch wird an den oberen, linken Anschlag gefahren. Er bildet damit den Nullpunkt des Koordinatensystems des Scantisches. Die Motorstromstärke wird auf automatische Regelung und die Betriebsart auf Vollschritt gestellt.

Fahren: Zum Fahren des Scantisches auf direkt einzugebende Positionen oder per Cursortasten. Dabei bewegen die Cursortasten den Scantisch um $1/10\text{ mm}$, die Kombination der SHIFT-Taste mit den Cursortasten um 1 mm .

Schrittgröße: Umschalten zwischen Voll- und Halbschrittbetrieb.

Motorstrom: Einstellen auf hohen oder niedrigen Motorstrom. Die Einstellung AUTO bewirkt den automatischen Wechsel zwischen hohem Motorstrom, wenn die Motoren laufen, und niedrigem Motorstrom bei Motorstillstand.

Lichtmischer absキャンen: Diese Funktion steuert das Abscannen von Lichtmischern. Zu den nötigen Eingaben wird nach unten angegebener Reihenfolge aufgefordert. In der momentanen Version ist es noch nicht möglich, diese Eingabenfolge zu unterbrechen und zum Menu zurückzukehren. Bei Fehleingaben hilft nur der Programmabbruch mit CTRL-E, dabei wird jedoch die Kameraeinstellung nicht in „last.sup“ gespeichert.

1. Obere linke Ecke eingeben: Die Faser wird am oberen linken Eck positioniert und mit q (Quit) bestätigt.
2. Unters rechtes Eck eingeben: Wie oben linkes unteres Eck anfahren und bestätigen.
3. Anzahl der Schritte in X-Richtung
4. Anzahl der Schritte in Y-Richtung
5. Einstellen des Aufnahme Fensters
6. Anzahl der Einzelaufnahmen die pro Bild gemittelt werden sollen.

Danach erscheint die Aufforderung, das FTP-Programm auf dem Unix-Cluster zu starten. Erst wenn dadurch die von ccdtool geöffnete Pipe „/pipe/hp11“ ausgelesen wird läuft der Scanvorgang durch. Es muß also darauf geachtet werden, daß auf der Platte, auf die die Daten transferiert werden, genügend Platz ist. Der Platzbedarf S in Byte eines Scandurchgangs berechnet sich nach:

$$S = (\text{Anzahl der Pixel}) \times (\text{Schritte in X-Richtung}) \times (\text{Schritte im Z-Richtung}) + 128$$

Quit: Zurück zum Hauptmenu

B.1.7 Das Datenformat

Einzelne Bilder werden mit einem 128 Byte großen Bildheader abgespeichert, der zu dem des Eltec-Software-Manuals kompatibel ist. Einzelne Werte besitzen jedoch eine eigene Interpretation. Ihm folgen Zeile für Zeile sequentiell die 1 Byte großen Grauwerte einer Zeile.

Für die Daten eines kompletten Scandurchgangs wird der gleiche Bildheader am Anfang vorangestellt. Ihm folgen die Bilder der einzelnen Positionen in obigem Format ohne eigenen Header.

B.2 Die Programme zur Datenkonvertierung

Es ist allgemein zu beachten, das der Ursprung eines Bildes bei „ccdtool“ die obere linke Ecke ist, bei PAW jedoch die linke untere Ecke.

Zur Umwandlung der Daten in PAW-NTUPLE stehen auf dem UNIX-Cluster folgenden Programmpaare zur Verfügung, welche per Pipe verbunden werden müssen. Im Folgenden werden die Programmaufrufe angeführt:

B.2.1 readpic [name.pic] | bookpic [hbookfile] [ID]

wandelt ein Bild in ein NTUPEL um.

name.pic: vollständiger Name des Bildes

hbookfile: Name des HBOOK-File; das Suffix „.hbook“ wird angehängt.

ID: ID-Nummer des NTUPEL

B.2.2 read2pic [name] | book2pic [hbookfile] [ID]

wandelt ein Bild und das Bild seiner Standartabweichung in ein gemeinsames NTUPEL um.

name: Name des Bildes und des Bildes der Standartabweichung; es wird jeweils das Suffix „.pic“ und „.err“ angehängt

hbookfile: Name des HBOOK-File; das Suffix „.hbook“ wird angehängt.

ID: ID-Nummer des NTUPEL

B.2.3 readscan [name] [X] [Z] | bookscan [hbookfile] [ID]

wandelt das Datenfile eines Scandurchgangs in ein NTUPEL um. Die Einzelbilder befinden sich in der NTUPEL-Variable picar. Diese 1-Dimensionale Feldvariable enthält entsprechend X-Bin, Y-Bin die Grauwerte der Bildpunkte in sequentieller Reihenfolge.

name: vollständiger Name des Datenfiles eines Scandurchgangs

X-Bin Binnig der Ausgangsfläche in X-Richtung im Ntuple

Y-Bin Binnig der Ausgangsfläche in Y-Richtung im Ntuple

hbookfile: Name des HBOOK-File; das Suffix „.hbook” wird angehängt.

ID: ID-Nummer des NTUPEL

B.2.4 readpic [name.pic] [abs] | photgen [filename]

erzeugt ein Photonenfile für das Simulationsprogramm aus einer gemessenen Winkelverteilung

name.pic: vollständiger Name des Bildes einer Winkelverteilung

filename: Name des Photonfiles das erzeugt wird; das Suffix „.pho” wird angehängt.

Literaturverzeichnis

- [Bor 72] Max Born
Optik, Springer-Verlag-Heidelberg 1972
- [Con 94] Conrad-Elektonic Hirschau
Elektronik-Hauptkatalog 1994
- [Elh 91] ELTEC-Electronik-GmbH Mainz
IPP Hardware Manual, Revision 2A, 1991
- [Els 91] ELTEC-Electronik-GmbH Mainz
IPP Software Manual, 1991
- [H1D 93] H1-Collaboration *The H1 Detector at HERA, DESY 93-103 1993*
- [H1P 93] H1-Collaboration *Tecnical Proposal to Upgrade the Backward Scattering Region of the H1-Detector, DESY 1993*
- [Hec 94] Andreas Heck
Serienmessungen an Fine-Mesh-Photomultipliern in Magnetfeldern bis zu 1.2 Tesla, Diplomarbeit, Heidelberg 1994
- [Ise 88] isel-Automation Eiterfeld
Schrittmotorantriebe in Positionier- + Koordinatensteuerungen, 1988
- [IsK 94] isel-Automation Eiterfeld
Gesamtkatalog 1994
- [Jan 93] Joachim Janoth
Untersuchungen zum Verhalten von Photomultipliern in Magnetfeldern bei Feldstärken bis zu 2 Tesla, Diplomarbeit, Dortmund 1993
- [Kle 94] Klaus Klein
Aufbau eines Experimentes zur automatisierten Vermessung charakteristischer Parameter von Fine-Mesh Photomultipliern, speziell der Untersuchung der Inhomogenitäten der Photokathode, Diplomarbeit, Heidelberg 1994
- [Leh 94] Frank Lehner
Untersuchungen an Modulen eines neuen Spaghetti-Kalorimeters für den H1-Detektor, Diplomarbeit, Hamburg 1994
- [Men 89] Micro-Electronik-GmbH Nürnberg
Manual zur A201 Ein-/Ausgabe Grundkarte, 1989

- [Pov 93] Bogdan Povh
Skript zur Vorlesung Physik VI, Teilchen und Kerne, Heidelberg, 1993
- [Spi 93] Spindler & Hoyer GmbH & Co. Göttingen
Gesamtkatalog 1993
- [Ste 95] Achim Stellberger
interne Mitteilung, 1995
- [Zas 87] Peter Zastrow
Fernsehempfangstechnik, Frankfurter Fachverlag 1987
- [Zub 95] Dr. Kai Zuber
interne Mitteilung, 1995

Danksagung

An erster Stelle gilt mein Dank Prof. Dr. K. Meier sowohl, für die Möglichkeit diese Diplomarbeit bei ihm zu machen, als auch für das ständige Interesse an ihrer Entwicklung.

Daran anschließen möchte ich meinen Dank an Prof. Dr. K. Tittel für die Bereitschaft zur Zweitkorrektur.

Ebenso danke ich Dr. K. Zuber der die Arbeit betreute. Er war jederzeit für mich ansprechbar und verstand es Überlegungen, Ideen und Sorgen ins rechte Licht zu rücken.

Großen Dank schulde ich Hr. K. Schmitt, dessen Betreuung des elektronischen Aufbaus mir eine große Hilfe war. Zudem weihte er mich mit viel Sachverstand, gepaart mit der Gabe, diesen anschaulich zu vermitteln, in die tiefen Geheimnisse des Betriebssystems OS-9 und der Realtime-Programmierung ein.

Dank auch den Herren M. Keller und P. Stock, die ebenfalls jederzeit bereit waren mir mit Rat und Tat zur Seite zu stehen, sowie den Herren R. Megele, T. Steigleder und E. Ulses, die ich gleichfalls stets offen und hilfsbereit erleben durfte.

Für den mechanischen Aufbau sowie die Herstellung der vermessenen Lichtmischer danke ich Hr. H. Meier. Er wies keinen meiner Sonderwünsche zurück und verstand es, aus Prinzipskizzen Werkstücke anzufertigen, die meine Erwartungen stets übertrafen.

Für die Bereitschaft sich mit unzähligen Fragen zu UNIX, FORTRAN, PAW und \LaTeX bombardieren zu lassen danke ich C. Brune und S. Tapprogge. Zumal sie kaum eins meiner Probleme ungelöst ließen.

Herzlichen Dank an Joachim Janoth, der mir im Gespräch in manchen persönlichen Dingen eine große Hilfe war.

In den Dank an die Damen Grimm, Piper, Schmitt und Spinnler sowie die Herren Damaschek, Golebka und Roland für die Atmosphäre der Freundlichkeit und Hilfsbereitschaft in der ich mich stets wohlfühlt habe, seien auch alle noch ungenannten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Instituts eingeschlossen.

Viel verdanke ich meinen Freunden A. Mohr, M. Schwager und M. Werner, die weit mehr waren als nur Studienkollegen und von denen ich sehr viel lernen konnte, was dem Volksmund nach, „fürs Leben“ ist.

Danken möchte ich nun noch meinen Eltern, die mir das Studium ermöglichten und bei denen ich jederzeit Unterstützung fand.

Abschließen möchte ich mit dem Dank an meine Frau Esther. Sie während den Prüfungen und der Diplomarbeit an meiner Seite zu wissen, war von allen Hilfen die wesentlichste.