



UNIVERSITÄT BONN

Physikalisches Institut

Steuerung des Laserstrahls im Kalibrationssystem der Jetkammer des OPAL-Detektors

von
Horst Neumann

Abstract: The OPAL jet chamber is calibrated by means of UV-Laser beams. A complex optical system containing 226 mirrors has been set up to guide the beams into the chamber. The distance between Laser and chamber is about 16 m and the beams have to be positioned in the chamber with an accuracy better than 0.5 mm.

The beam position is measured by 96 Lateral Effect Diodes with a spatial resolution of about 80 μm and controlled by microcomputer systems (VME) which steer 4 movable mirrors with a precision of 5 μm .

A control program has been tested first with a simulation of the Laser calibration system. It operates successfully since LEP start. Stability has been investigated – especially the independence of the control program on critical mechanical parameters.



Thesis-1990-Neumann

Post address:
Postfach 12
5300 Bonn 1
Germany

BONN-IR-90-31
Bonn University
Juni 1990
ISSN-0172-8741

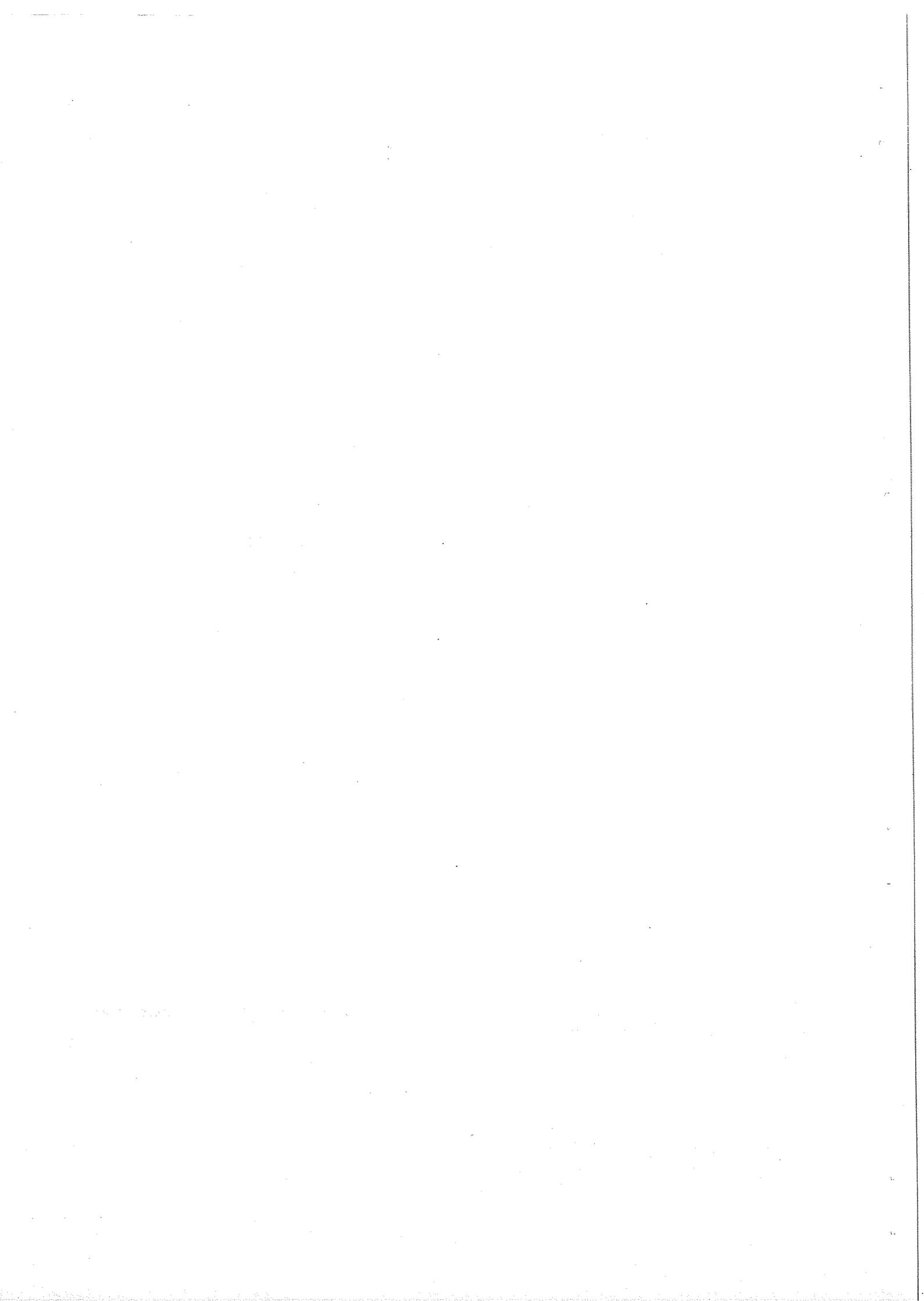
UNIVERSITÄT BONN
Physikalisches Institut

**Steuerung des Laserstrahls
im Kalibrationssystem
der Jetkammer des OPAL-Detektors**

von
Horst Neumann

Dieser Forschungsbericht wurde als Diplomarbeit von der mathematisch - naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bonn angenommen.

Angenommen am: 29. Juni 1990
Referent: Prof. Dr. B.Nellen
Korreferent: Prof. Dr. H.M.Fischer



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Die OPAL-Jetkammer und ihre Kalibration mit UV-Laserstrahlen	5
2.1	Aufbau der Jetkammer	5
2.2	Wichtige Kalibrationskonstanten	5
2.3	Kalibration der Jetkammer mit UV - Laserstrahlen („Laserkalibration“)	7
3	Die Komponenten des Laser-Kalibrationssystem	10
3.1	Der Laser	10
3.2	Die Optik	10
3.3	Der Superspiegel zur Steuerung des Laserstrahls	12
3.4	Das Verteilerrad	14
3.5	Der Laserkonus	15
3.5.1	Der polarisationsempfindliche Strahlteiler	18
3.6	Die Positionsmonitore: Aufbau und Funktion	19
3.6.1	Nichtlinearitäten der Positionsmonitore	19
3.6.2	Die Linearisierung	20
3.6.3	Weitere Einflüsse auf die Positionsbestimmung	21
3.7	Die Elektronik zur Steuerung des Kalibrationssystems	24
4	Die Steuerung des Lasersystems	26
4.1	Der Algorithmus zur Korrektur der Strahlage	26
4.1.1	Bestimmung der Steuermatrizen	29
4.1.2	Mögliche Verfeinerung des Algorithmus	30
4.2	Einfädeln des Laserstrahls	31
4.3	Struktur der Programme zur Steuerung des Laser-Kalibrationssystems	32
4.3.1	Vorteile modularer Programmierung	33
5	Test des Algorithmus	36
5.1	Genauigkeit und Reproduzierbarkeit	37
5.2	Stabilität	37
5.3	Weitere Einflüsse	40
5.4	Untersuchungen zu möglichen Reflexionen	41

6	Messung der Position des Verteilerrades	43
6.1	Anforderung an die Justierung des Verteilerrades	43
6.2	Berechnung der Position des Verteilerrades	45
7	Zusammenfassung	47

OPAL

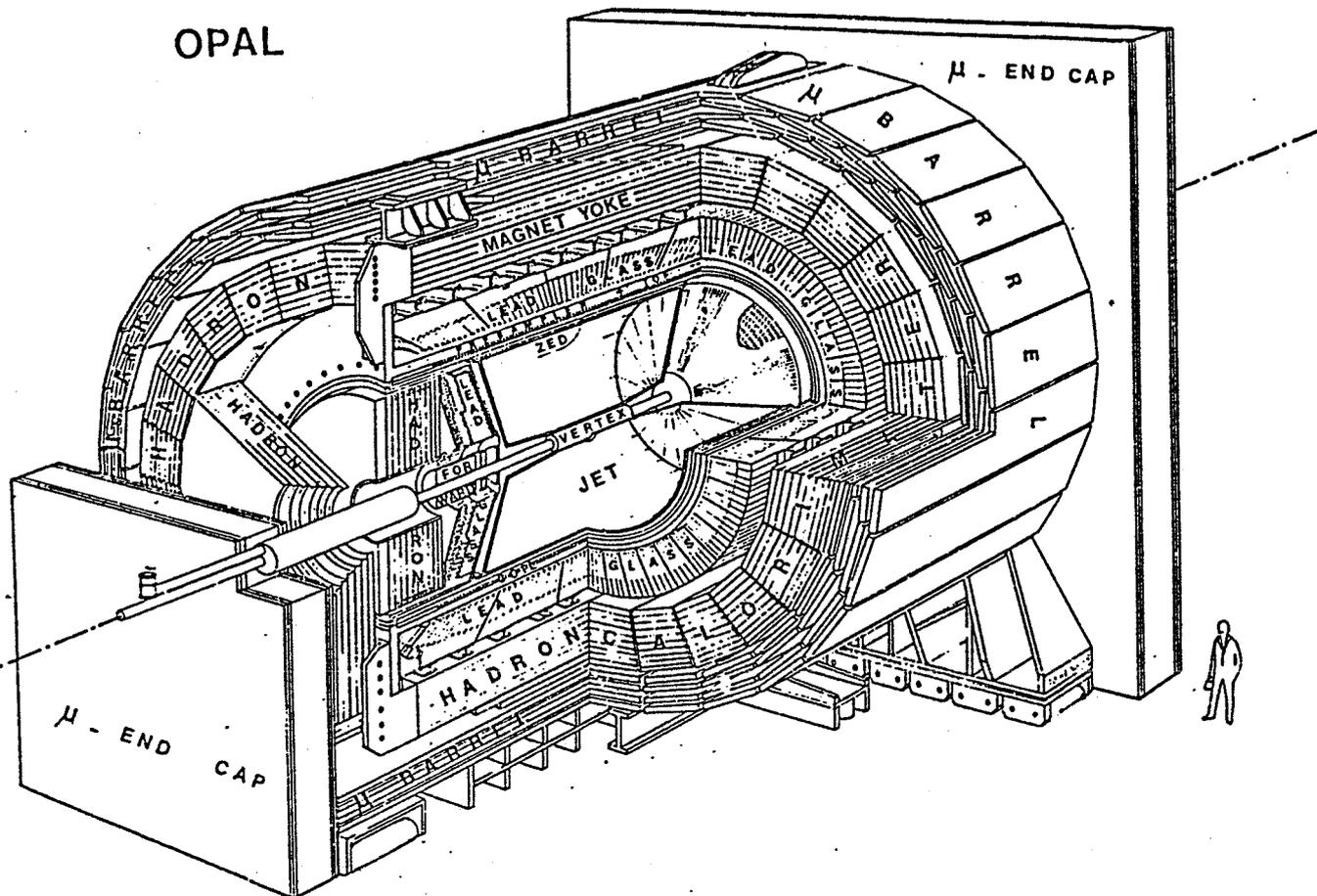


Abb. 1: Der OPAL-Detektor

1 Einleitung

Im August 1989 wurde am CERN die erste Ausbaustufe des großen Elektron-Positron-Speicherringes LEP bei einer Schwerpunktsenergie von 2×45.5 GeV in Betrieb genommen. In der zweiten Ausbaustufe soll die Energie auf 2×100 GeV erhöht werden. Die Annihilation von Elektronen und Positronen an LEP wird von den vier Detektoren ALEPH, DELPHI, L3 und OPAL untersucht. Zum Nachweis leptonischer und hadronischer Reaktionsprodukte zeigen alle Detektoren einen schalenartigen Aufbau aus verschiedenen Subdetektoren. Diese unterscheiden sich zum Teil in ihrem Aufbau erheblich, jedoch zeigen sie eine große Übereinstimmung in ihren Funktionen. Im folgenden wird kurz der Aufbau des OPAL-Detektors (Abb. 1) skizziert [OPAL83, OPAL90], an dessen Aufbau und Betrieb die Bonner Gruppe beteiligt ist:

Ein Vertexdetektor, Driftkammer, umschließt den Wechselwirkungspunkt. Die 1 m lange Kammer liefert Koordinaten für Radien von 85 bis 235 mm senkrecht zum Strahlrohr. Sie zeichnet sich durch eine hohe Auflösung in den Raumkoordinaten und eine gute Doppelspurauflösung aus. Dies erlaubt eine genaue Rekonstruktion der Spuren geladener Teilchen und Sekundärvertices.

Die große Jetkammer und die Vertexkammer dienen zum Nachweis und zur Vermessung von Spuren geladener Teilchen. Die Jetkammer deckt den gesamten Raumwinkelbereich zu 96% ab und hat eine mittlere Länge von 3.8 m. Sie liefert $R-\phi$ Koordinaten – als $R-\phi$ Ebene ist die Ebene senkrecht zur Strahlrichtung definiert – für Radien von 240 bis 1800 mm. Die Auflösung der Kammer beträgt $130 \mu\text{m}$ in $R-\phi$ und ca. 4 cm in der z -Koordinate; die z -Achse ist durch die Strahlrichtung gegeben. Spezielle z -Kammern umgeben die Jetkammer. Sie verbessern die Messung der z -Koordinate ge-

ladener Teilchen auf eine Genauigkeit von ca. 300 μm .

Die drei Detektoren **Vertex**, **Jet-** und **z-Kammer** befinden sich in einer **Spule**, in deren Zentrum ein Magnetfeld von 0.435 Tesla erzeugt wird. Die Krümmung der Spuren geladener Teilchen im Magnetfeld erlaubt die Bestimmung von Ladung und Impuls.

Szintillationszähler umgeben die Spule zur Messung der Flugzeit (**TOF**). An die TOF-Zähler schließt sich das **elektromagnetische Kalorimeter** an. Dieses dient zur Messung der Energie elektromagnetisch wechselwirkender Teilchen, wie z.B. Elektronen oder Photonen. Das Kalorimeter besteht aus Blöcken aus Bleiglas und deckt nahezu den gesamten Raumwinkel ab. Ein **Presampler** befindet unmittelbar zwischen dem Kalorimeter und den TOF-Zählern. Seine Aufgabe ist die Verbesserung der Energieauflösung.

Weiter außen schließt sich das Rückführjoch des Solenoiden an. Es besteht aus mehreren Lagen Eisenplatten. Zwischen diesen Platten befinden sich „Streamer“-Röhren und Proportionalkammern, die zusammen mit dem Eisen das **Hadron-Kalorimeter** zur Erfassung der hadronischen Energie bilden.

Zur Identifikation der Muonen ist der gesamte Detektor von 4 Lagen **Muon-Kammern** umgeben.

Zur Kalibration und Überwachung der **OPAL-Jetkammer** werden zwei **UV-Laser** eingesetzt. Da die Laser aus Platz- und Wartungsgründen nicht in den Detektor eingebaut werden können, wird ein aufwendiges System aus **226 Spiegeln** verwendet, das die Laserstrahlen auf 48 verschiedenen Strahlwegen in die 24 Sektoren der Jetkammer leiten. Dabei muß der Laserstrahl nach einer Strecke von 15 m eine Fläche von nur 1 mm^2 treffen. Daher wird die Strahllage mit **96 Positionsmonitoren** mit einer Genauigkeit von 0.01 mm gemessen. Ein Rechnersystem erfaßt und korrigiert die Strahllage mit zwei Systemen aus motorisch fahrbaren Spiegeln.

Das Thema der vorliegenden Arbeit ist die Steuerung der Laserstrahlen im Kalibrationssystem des OPAL-Detektors.

Zur Entwicklung der Steuerprogramme wurde eine Simulation der Hardware erstellt. Mit dieser Simulation konnten die Eigenschaften des Kalibrationssystems untersucht werden. Die Arbeit gliedert sich in folgende Punkte:

- Beschreibung des Aufbaus und der Funktion des Kalibrationssystems.
- Untersuchungen über die Ortsinformationen der Positionsmonitore.
- Beschreibung der Algorithmen zur Steuerung des Laserstrahls im Kalibrationssystem.
- Beschreibung der Implementation der Verfahren auf einem Mikroprozessorsystem.
- Untersuchungen zur Stabilität der Verfahren.
- Untersuchungen der Toleranzen des Systems gegen mechanische Dejustierungen.

Zum Schluß wird eine Zusammenfassung der Ergebnisse gegeben.

2 Die OPAL-Jetkammer und ihre Kalibration mit UV-Laserstrahlen

Um mit der Jetkammer Teilchenspuren mit möglichst hoher Präzision vermessen zu können, ist eine genaue Kalibration notwendig. Die Kalibration der Kammer wird mit UV-Laserstrahlen durchgeführt. Dazu wurde von der Bonner OPAL-Gruppe ein Kalibrationssystem entwickelt und aufgebaut.

Eine ausführliche Beschreibung der OPAL-Jetkammer ist in [OPAL83, Fis86, Heu88, OPAL90] zu finden. Die Physik einer Jetkammer ist in [Sauli77, Klk84] dargestellt.

2.1 Aufbau der Jetkammer

Die OPAL-Jetkammer ist eine 4 m lange, zylindrische Kammer mit einem Außendurchmesser von ≈ 3.7 m. Sie ist rotationssymmetrisch um die Strahlrichtung (z -Achse) in 24 identische Sektoren unterteilt. Jeder dieser Sektoren deckt somit ein Kreissegment von 15° ab. Jeweils 639 Kathodendrähte trennen die Sektoren voneinander [OPAL83]. In Abb. 2 ist ein Sektor schematisch dargestellt. Man erkennt die Signaldrahtebene, die jeden Sektor in 2 Halbsektoren unterteilt. Die 159 Signaldrähte haben einen Abstand von 10 mm. Sie sind um $\pm 100 \mu\text{m}$ aus der Symmetrieebene heraus versetzt (Staggering). Zwischen den Signaldrähten liegen jeweils die Potentialdrähte. Zusätzliche feldformende Komponenten begrenzen jeden Sektor. Die elektrischen Spannungen an den Kathoden- und Potentialdrähten sind so gewählt, daß überall ein homogenes Driftfeld von ca. 940 V/cm herrscht [OPAL83, OPAL90]. Die maximale Driftstrecke beträgt 34 mm am inneren und 243 mm für den äußeren Signaldraht. Als Gas findet ein Gemisch aus 88.2% Argon, 9.8% Methan und 2% Iso-Butan bei einem Druck von 4 bar Verwendung [OPAL83, OPAL90]. Bei dieser Feld-Gas Konfiguration wurde mit dem Kalibrationssystem eine Driftgeschwindigkeit von $52.9 \mu\text{m/ns}$ gemessen [Mar89]. Die Gasverstärkung wird auf etwa 10^1 eingestellt [OPAL83, Hau88, OPAL90]. Das Magnetfeld von 0.435 Tesla parallel zur Strahlachse dreht die Driftzellen um den Lorentzwinkel $\alpha_L \approx 20^\circ$. Dadurch verlängert sich die Driftstrecke um den Faktor $1/\cos \alpha_L$ [Bad84, Rahn88]. In Abb. 4 ist die Drehung der Driftzellen im Magnetfeld dargestellt.

2.2 Wichtige Kalibrationskonstanten

Durchläuft ein ionisierendes Teilchen die Kammer, so driften die freigesetzten Elektronen mit nahezu konstanter Driftgeschwindigkeit entlang den Feldlinien auf die Signaldrähte zu. Zur Rekonstruktion der Teilchenspuren werden die Zeitdifferenzen t_m zwischen einem Startsignal und den von den Elektronen erzeugten Signalen auf den Signaldrähten gemessen. Aus den tatsächlichen Driftzeiten t_d und der (konstanten) Driftgeschwindigkeit v_d ergibt sich der Abstand s eines Teilchens vom Signaldraht über die Beziehung

$$s = v_d t_d.$$

Zur Bestimmung der Spurpunkte aus den Driftzeiten braucht man eine Reihe von Kalibrationskonstanten:

die relativen Zeitnullpunkte: Die tatsächliche Driftzeit t_d der Elektronen setzt sich zusammen aus der gemessenen Driftzeit t_m und den relativen Zeitnullpunkten [Hau88]:

$$t_d = t_m - (T_{0,gl0} + t_{0,i}) \pm t_{st}.$$

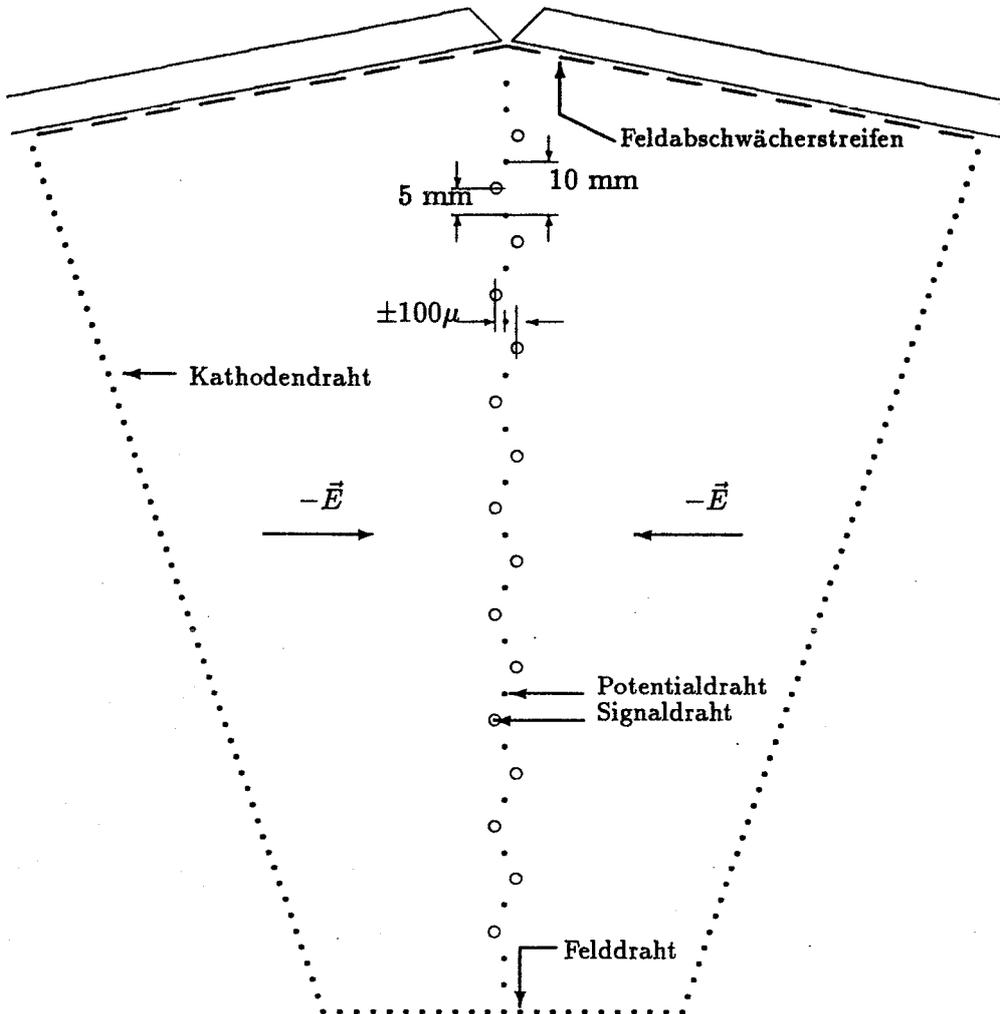


Abb. 2: Schematischer R - ϕ Schnitt durch einen Sektor der OPAL-Jetkammer. Man erkennt den Versatz der Signaldrähte, die Kathoden- und Potentialdrähte, sowie die äußeren feldformenden Komponenten.

Dabei sind:

- $T_{0, glo}$, der globale Zeitnullpunkt. Dieser gibt die Zeitdifferenz zwischen dem gemeinsamen Triggersignal für die Ausleseelektronik und dem Zeitpunkt an, zu dem das Teilchen den Sektor zu durchlaufen beginnt.
- $t_{0, i}$, die individuellen Zeitnullpunkte. Diese Größen sind durch unterschiedliche Signallaufzeiten und Verstärkeranstiegszeiten begründet.
- t_{st} , die Zeitverschiebungen aufgrund des Drahtversatzes. Dieser äußert sich in einem Versatz der Driftzeiten um $\pm t_{st}$. Das Vorzeichen hängt davon ab, ob das Teilchen links oder rechts der Signaldrahtebene den Sektor durchläuft. Damit ist eine Auflösung der *rechts-links-Mehrdeutigkeit* der Spurlage möglich.

die Driftgeschwindigkeit v_d : Mit der Beziehung $s = v_d t_d$ wird die Driftstrecke und somit der Ort in der R - ϕ Ebene bestimmt. Dabei wird die Driftgeschwindigkeit als konstant vorausgesetzt. Diese Annahme ist nur in unmittelbarer Umgebung der Potentialdrähte nicht erfüllt, so daß dort zusätzliche Korrekturen notwendig sind [Bie89].

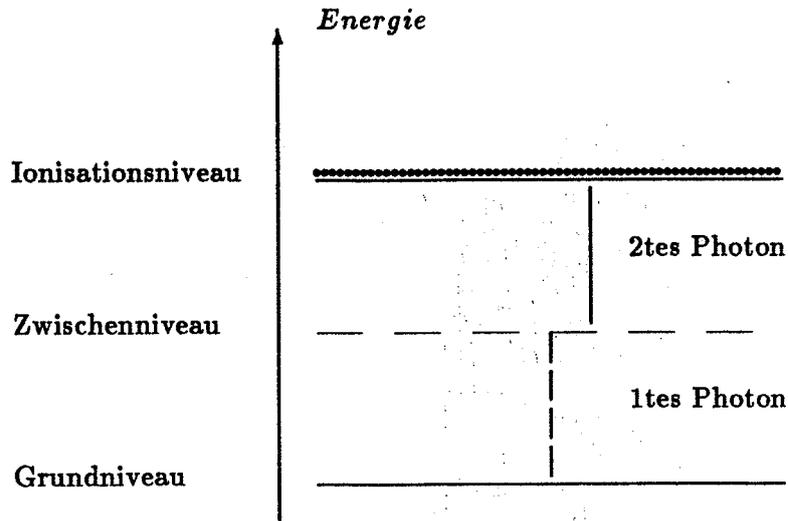


Abb. 3: Ionisation des Kammergases: Die Ionisation erfolgt in einem Zwei-Photon-Prozeß.

der Lorentzwinkel α_L : Die Drehung der Driftzellen im Magnetfeld ist eine weitere wichtige Kalibrationskonstante.

die eff. Drahtlänge L_{eff} & der rel. Verstärkungsfaktor g : Die z -Koordinate wird nach dem Prinzip der Ladungsteilung bestimmt:

$$z = -\frac{Q_{-z} - gQ_{+z}}{Q_{-z} + gQ_{+z}} l_{eff}. \quad (2.1)$$

Dabei sind Q_{-z} und Q_{+z} die an beiden Drahtenden jeweils gemessenen Ladungen, g ist der relative Verstärkungsfaktor von den Verstärkern an beiden Seiten und l_{eff} ist die effektive Drahtlänge. Beide Größen müssen bestimmt werden [Kle88, Wolf90].

die abs. Drahtpositionen: Um aus der Driftstrecke s die absoluten Raumkoordinaten in der $R-\phi$ Ebene zu berechnen, müssen die absoluten Drahtpositionen der Signaldrähte genau bekannt sein.

Eine ausführliche Diskussion zur Problematik der Bestimmung der geometrischen Kalibrationsgrößen ist bei [Hau88] zu finden.

2.3 Kalibration der Jetkammer mit UV - Laserstrahlen („Laserkalibration“)

Bis vor wenigen Jahren wurden zur Bestimmung der Kalibrationskonstanten von Driftkammern ausschließlich Teilchendaten (z.B. aus Höhenstrahlung oder aus radioaktiven Präparaten) verwendet. Umfangreiche Voruntersuchungen haben aber gezeigt, daß auch mit Lasern eine Jetkammer sehr genau kalibriert werden kann [Hil80]. Danach werden in sehr geringen Anteilen (10^{-8} - 10^{-10}) vorhandene Verunreinigungen des Kammergases in einem Zwei-Photon-Prozeß ionisiert (Abb. 3). Man findet eine gleichmäßige Ionisation entlang der Laserspür [Hau88, Schr87]. Die Möglichkeiten und Techniken der Kalibration mit Hilfe von Lasern in Hinblick auf die OPAL-Jetkammer sind bei [Hau88] genau beschrieben.

Im folgenden wird kurz das Prinzip zur Bestimmung der wichtigen Kalibrationskonstanten α_L , v_d , g und l_{eff} dargestellt; die Bestimmung der Zeitnullpunkte und Geometriekorrekturen ist bei [Hau88, Sim89, Bug90] zu finden.

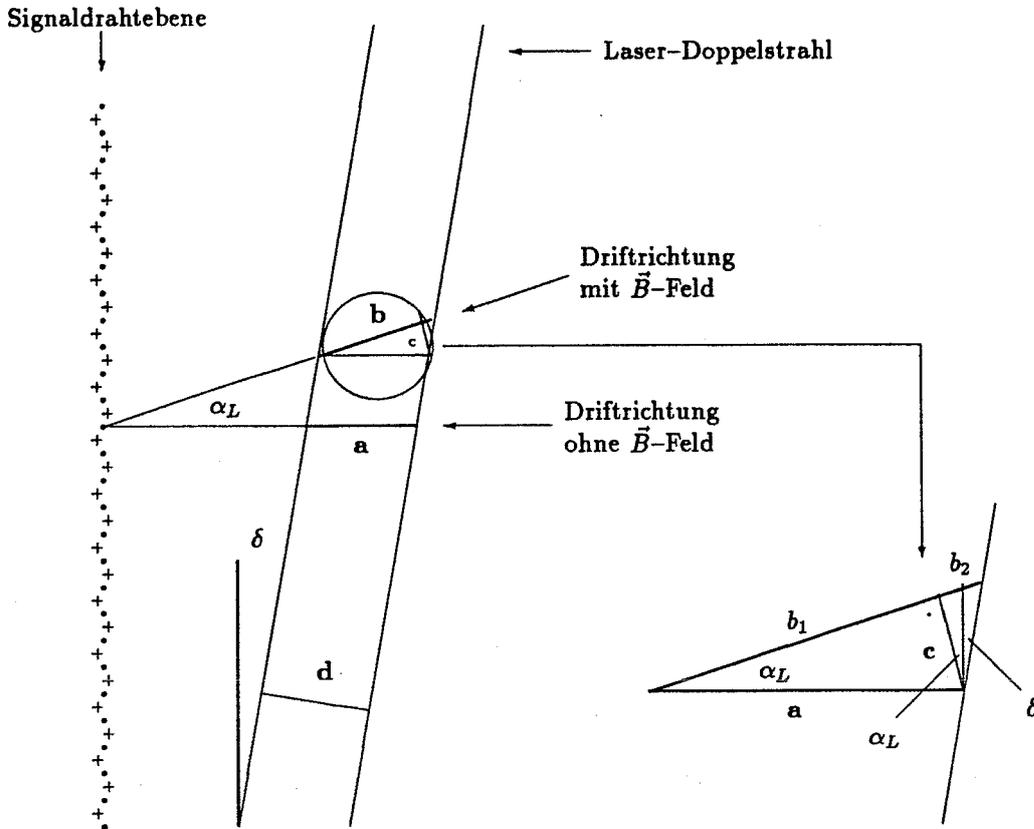


Abb. 4: Skizze zur Bestimmung des Lorentzwinkels. a ist die Driftstreckendifferenz ohne Magnetfeld, b die bei eingeschaltetem Feld, d = Doppelstrahlabstand. (Entnommen aus [Rahn88].)

In der Abb. 4 ist zur Verdeutlichung des Lorentzwinkels der Ausschnitt eines Sektors zu sehen. Zwei Laserstrahlen (Strahl-1 und Strahl-2) mit genau bekanntem Abstand d durchlaufen den Sektor unter einem Winkel δ relativ zur Signaldrahtebene. Die freigesetzten Elektronen driften im elektrischen Feld auf den Signaldraht zu und erreichen ihn nach Zeiten¹ $t_{1,B=0}$ bzw. $t_{2,B=0}$. Aus der Geometrie und der vereinfachenden Annahme einer konstanten und vom B-Feld unabhängigen² Driftgeschwindigkeit ergibt sich

$$v_d = \frac{d / \cos \delta}{(t_{2,B=0} - t_{1,B=0})}$$

Mißt man zusätzlich die Driftzeiten $t_{1,B \neq 0}$ und $t_{2,B \neq 0}$ bei eingeschaltetem Magnetfeld, so erhält man den Lorentzwinkel über die Gleichung [Bad84, Rahn88]

$$\alpha_L = \arccos \left(\frac{t_{2,B=0} - t_{1,B=0}}{t_{2,B \neq 0} - t_{1,B \neq 0}} \cos \delta \right) - \delta.$$

Da zur Berechnung des Lorentzwinkels und der Driftgeschwindigkeit nur Differenzen gemessener Zeiten verwendet werden, sind systematische Fehler bei der Bestimmung der Driftzeiten von untergeordneter Bedeutung. Durch die mögliche hohe Anzahl von Messungen unter reproduzierbaren Bedingungen kann zudem der statistische Fehler sehr klein gehalten werden. Damit werden Geometrieeffekte und Feldverzerrungen meßbar [Hau89].

Bei OPAL wird abwechselnd (vgl. Kap. 3) immer nur mit einem Laserstrahl in die Kammer geschossen (alternierender Doppelstrahl). Damit werden Raumladungseffekte vermieden.

¹Zur Problematik der Zeitbestimmung siehe [Mich88, Scha85].

²Untersuchungen über das Verhältnis $\frac{v_{d,B=0}}{v_{d,B \neq 0}}$ ist bei [Luc90] zu finden.

Zur Kalibration der z -Koordinate Jetkammer nutzt man aus, daß eine Laserspur eine Gerade mit genau bekannter Lage im Raum ist. Über Relation 2.1 erhält man aus Messungen für zwei bekannte z -Positionen die gesuchten Größen l_{eff} und g . In der Abb. 5 ist ein r - z -Schnitt durch einen Sektor der OPAL-Jetkammer dargestellt. Sie zeigt zwei Laserstrahlen, die die Kammer bei verschiedenen z -Positionen in R-Richtung durchlaufen. Die z -Position des Laserstrahls ist dabei auf ca. 1 mm bekannt. Die erwartete Auflösung der Kammer in z ist ca. 4 cm, gemessen wurden 6 cm [Wolf90].

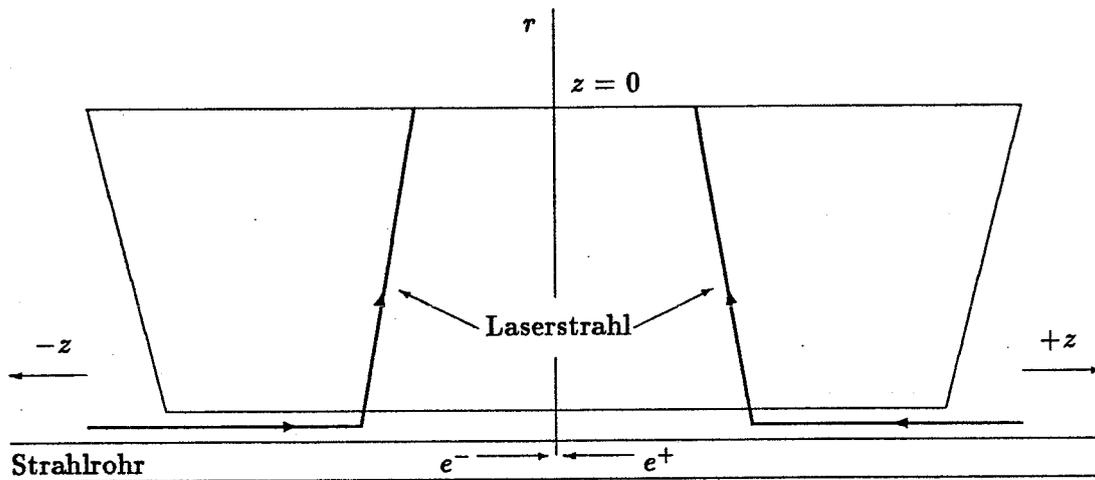


Abb. 5: r - z Schnitt durch einen Sektor der Jetkammer. Zwei Laserspuren bei verschiedenen z -Positionen werden zur Kalibration der z -Koordinate benötigt.

3 Die Komponenten des Laser-Kalibrationssystem

Wie schon eingangs erwähnt, werden Laserstrahlen zur Kalibration der OPAL-Jetkammer verwendet. Das Lasersystem besteht aus zwei identischen Subsystemen links und rechts des Detektors. Der Laserstrahl durchläuft die Sektoren für jede Seite der Jetkammer bei jeweils einer festen z-Position (Abb. 5).

In Abb. 6 sind beide Subsysteme und der OPAL-Detektor im Schnitt dargestellt. In den Laserhütten, die sich auf beiden Seiten des Detektors etwa auf Höhe des LEP-Strahlrohres befinden, sind je ein Laser und ein optisches System untergebracht, das den Laserstrahl in die Kammer fokussiert. Ein System motorisch verstellbarer Spiegel (Superspiegel SS), das fest an eine „bewegliche Abschirmung“ (Mobile Shielding) montiert ist, lenkt den Strahl auf die Spiegel des Verteilerrades (VR), das auf das Eisenjoch des Magneten des Detektors geschraubt ist, so daß der Strahl anschließend parallel zum LEP-Strahlrohr in den Drucktank der Jetkammer läuft.

Im Drucktank, mit 4.6 m Abstand zum Verteilerrad, befindet sich ein weiteres Spiegelsystem, der Laserkonus (SR). Damit wird der Strahl zwischen Jetkammer und Strahlrohr weiter zur Mitte und dann in die Jetkammer gelenkt.

Unmittelbar vor dem Eintrittsloch zur Jetkammer – das Loch hat einen Durchmesser von 18 mm – befindet sich der Strahlteiler zur Erzeugung des Doppelstrahles. Damit der Doppelstrahl den im Labor gemessenen [Hau88, Mar88] Abstand von 10 mm reproduziert, muß dieser Strahlteiler mit einer absoluten Genauigkeit von nur ± 0.5 mm getroffen werden.

Da der Abstand zwischen Superspiegel und den Strahlteilern je nach Sektor 7.7 m bis 9.0 m beträgt, erfordert dies eine Winkelgenauigkeit von $3 \cdot 10^{-3}$ Grad. Die Strahllage wird daher sowohl am Verteilerrad als auch am Laserkonus mit Positionsmonitoren gemessen. Mit diesen Informationen kann ein VME-Rechner, der das Laser-Kalibrationssystem steuert und überwacht, Korrekturen der Strahllage durch Nachsteuern des Superspiegels vornehmen.

Dieses komplexe Spiegelsystem ist notwendig, um den Laserstrahl durch den massiven äußeren Bereich des OPAL-Detektors zu leiten. Zudem laufen die Laserstrahlen innerhalb des Detektors durch Rohre, damit sie nicht durch herabhängende Kabel unterbrochen werden.

Im folgenden wird auf die einzelnen Komponenten des Laser-Kalibrationssystems eingegangen.

3.1 Der Laser

Es wird ein gepulster Nd:YAG-Laser verwendet; die Schußrate beträgt 5 bis 10 Hz. Die Pulsdauer beträgt einige ns, die Wellenlänge ist 1064 nm. Durch eine geeignete Modenblende wird erreicht, daß der Laser nur im Grundmode TEM₀₀ schwingt. Dadurch erhält man ein gaußförmiges Intensitätsprofil in der Ebene senkrecht zur Ausbreitungsrichtung [Schr87, Schr89]. Ein Polarisator im Resonator erzeugt linear polarisiertes Laserlicht. Für die Kalibration wird Laserlicht im UV-Bereich benötigt. Daher wird das infrarote Licht des Nd:YAG-Lasers zweifach frequenzverdoppelt: 1064 nm \rightarrow 532 nm \rightarrow 266 nm Wellenlänge. Eine genau Beschreibung des Nd:YAG-Lasers und der Frequenzvervielfachung ist in [Koe76, Schr87] zu finden.

3.2 Die Optik

Die Divergenz des Laserstrahles beträgt ca. 0.56 mrad [Schr87]. Dies bedeutet für einen Strahlweg von 16 m eine Aufweitung des Strahlprofils um 9 mm. Um für die Ionisation eine ausreichende Energiedichte zu erhalten, wird ein Strahldurchmesser von ≤ 2 mm benötigt. Zudem wird für die Kalibration mit Lasern eine gerade Laserspür über den gesamten Driftbereich in der Jetkammer

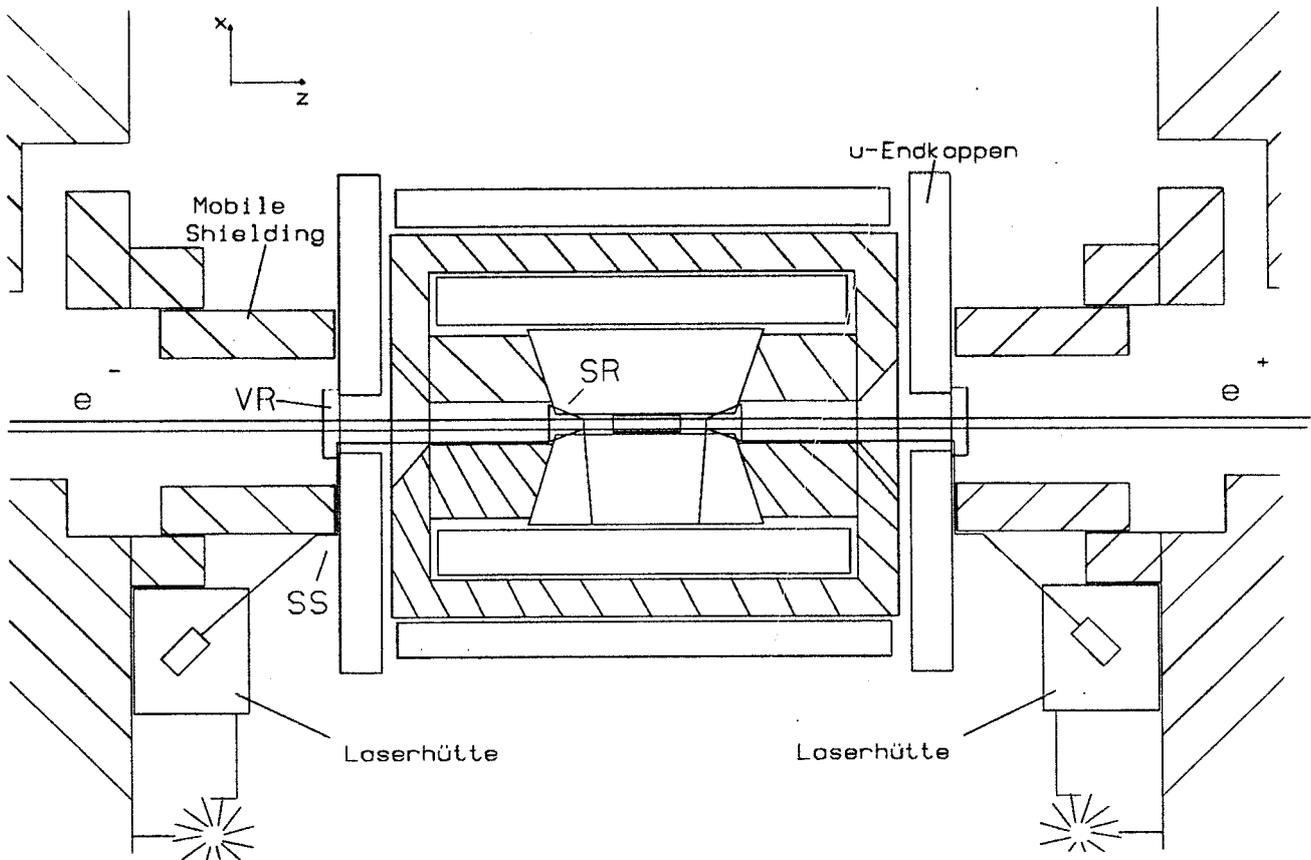


Abb. 6: Das Lasersystem besteht aus zwei identischen Subsystemen: Laser, optisches System und Elektronik zur Steuerung befinden sich in den Laserhütten, Superspiegel SS, Verteilerrad VR und Laserkonus SR befinden sich außen am Detektor bzw. sind im Inneren eingebaut. (Entnommen aus [Koch90].)

vorausgesetzt. Die Strahlwege in die Sektoren der Jetkammer sind zudem unterschiedlich lang. Daher wird der Laserstrahl mit einem Teleskop variabler Brennweite in die Jetkammer fokussiert. Es wird ein weicher Fokus bei einem minimalem Strahldurchmesser von ca. 1.2 mm eingestellt [Schr89].

Abb. 7 zeigt den Aufbau zur Erzeugung des Startsignals (*Triggersignal*) und die Optik zur Formung des Strahlprofils. Zwischen dem Laser und der Optik befindet sich eine Quarzplatte. Diese lenkt einen kleinen Teil des Laserlichtes auf eine Photodiode (VFD). Deren Ausgangssignal (*Triggersignal*) startet die Ausleseelektronik der Positionsmonitore und Jetkammer.

Zur Kalibration wird mit einem polarisationsempfindlichen Strahlteiler (siehe Kap. 3.5), der sich unmittelbar vor der Eintrittsöffnung zur Jetkammer befindet, ein Laser-Doppelstrahl erzeugt. Daher muß die Polarisation des Laserstrahls gesteuert werden können. Mit der Pockelszelle (PC) kann die Polarisationsenebene des Laserlichtes durch Einschalten einer Hochspannung um 90 Grad gedreht werden. Eine drehbare $\lambda/2$ Platte erlaubt jede gewünschte Polarisationsrichtung einzustellen. Somit kann durch Schalten der Hochspannung bei richtiger Einstellung der $\lambda/2$ -Platte zwischen Strahl-1 und -2 in der Kammer hin und her geschaltet werden.

Hochspannung, $\lambda/2$ -Platte und Teleskop werden von dem Mikroprozessorsystem gesteuert und überwacht.

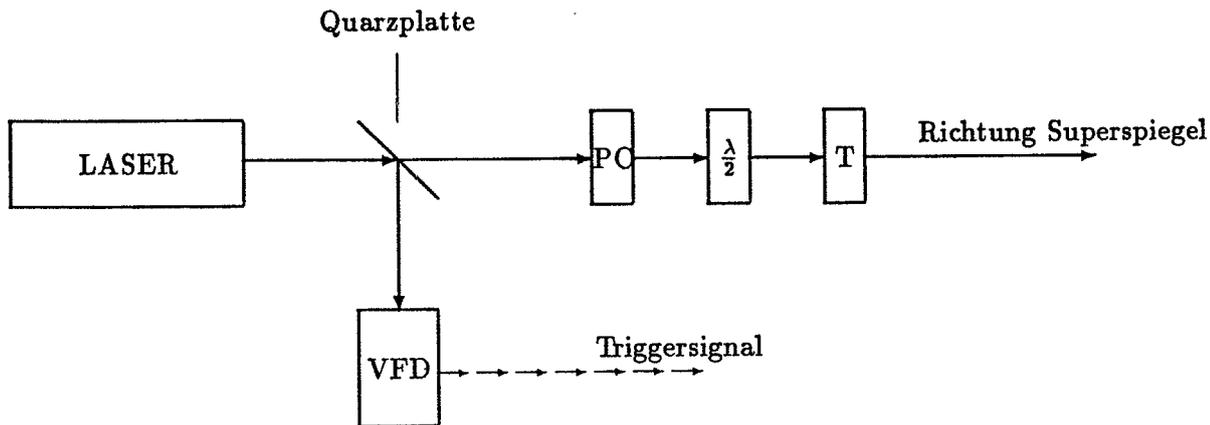


Abb. 7: Optische Bank: Zur Strahlformung wird ein Teleskop (T) eingesetzt. Die $\lambda/2$ -Platte dient zur Drehung der Polarisationssebene. Mit der Pockelszelle (PC) wird zwischen S- und P-Polarisation geschaltet. Die Photozelle (VFD) erzeugt das Startsignal (Trigger) für die Elektronik.

3.3 Der Superspiegel zur Steuerung des Laserstrahls

Der *Superspiegel* – ein System motorisch fahrbarer Spiegel – ist fest auf die bewegliche Abschirmung (vgl. Abb. 6) montiert, also zwischen dem Laser und dem Verteilerrad positioniert. Der Superspiegel hat zwei Aufgaben zu erfüllen:

- Er muß den Laserstrahl in jeweils einen der 24 Sektoren der Jetkammer lenken.
- Damit der Laserstrahl den Strahlteiler mit der geforderten Präzision von ± 0.5 mm trifft, muß er die Strahlage des Laserstrahls auf $\frac{1}{1000}$ Grad genau steuern können.

Eine Gerade im Raum kann durch einen Satz von 4 Parametern – die Richtung (2 Para.) und den Startpunkt in einer Ebene (2 Para.) – eindeutig beschrieben werden. Der Superspiegel wurde daher so gebaut, daß man die Richtung und den Startpunkt des auslaufenden Laserstrahls steuern kann.

Abb. 8 zeigt den Aufbau des Superspiegels. Er besteht aus den 3 Spiegeln M1, M2 und M3. Der Spiegel M3 ist um die Achsen y und z drehbar und sitzt auf einem in z-Richtung fahrbaren Schlitten. Dieser Schlitten und der Spiegel M2 sitzen wiederum auf einem weiteren, in y-Richtung fahrbaren Schlitten. Der Spiegel M1 dagegen ist fest montiert. Die Spiegel sind nun so eingestellt, daß der einlaufende Laserstrahl vom Spiegel M1 in y-Richtung genau auf M2 und von dort in z-Richtung auf M3 gelenkt wird. Die Koordinaten y und z sind somit voneinander entkoppelt. Damit wird der Spiegel M3, auch bei veränderter Position der Schlitten, immer an der gleichen Stelle getroffen. Durch Fahren der Schlitten wird somit der Startpunkt des auslaufenden Laserstrahls in der y-z Ebene verändert. Mit der Drehung des Spiegels M3 steuert man die Richtung des auslaufenden Strahls. Im folgenden wird der Drehwinkel um die y-Achse des Spiegels M3 mit θ , der Winkel um die z-Achse mit ϕ bezeichnet.

Motoren bewegen die Schlitten. Um den Superspiegel mit der notwendigen Genauigkeit steuern zu können, werden die Bewegungen der Schlitten mit Encodern genau erfaßt:

Es werden Linearmaßstäbe (y- und z-Achse) und Drehgeber (Winkel θ und ϕ) verwendet. Das

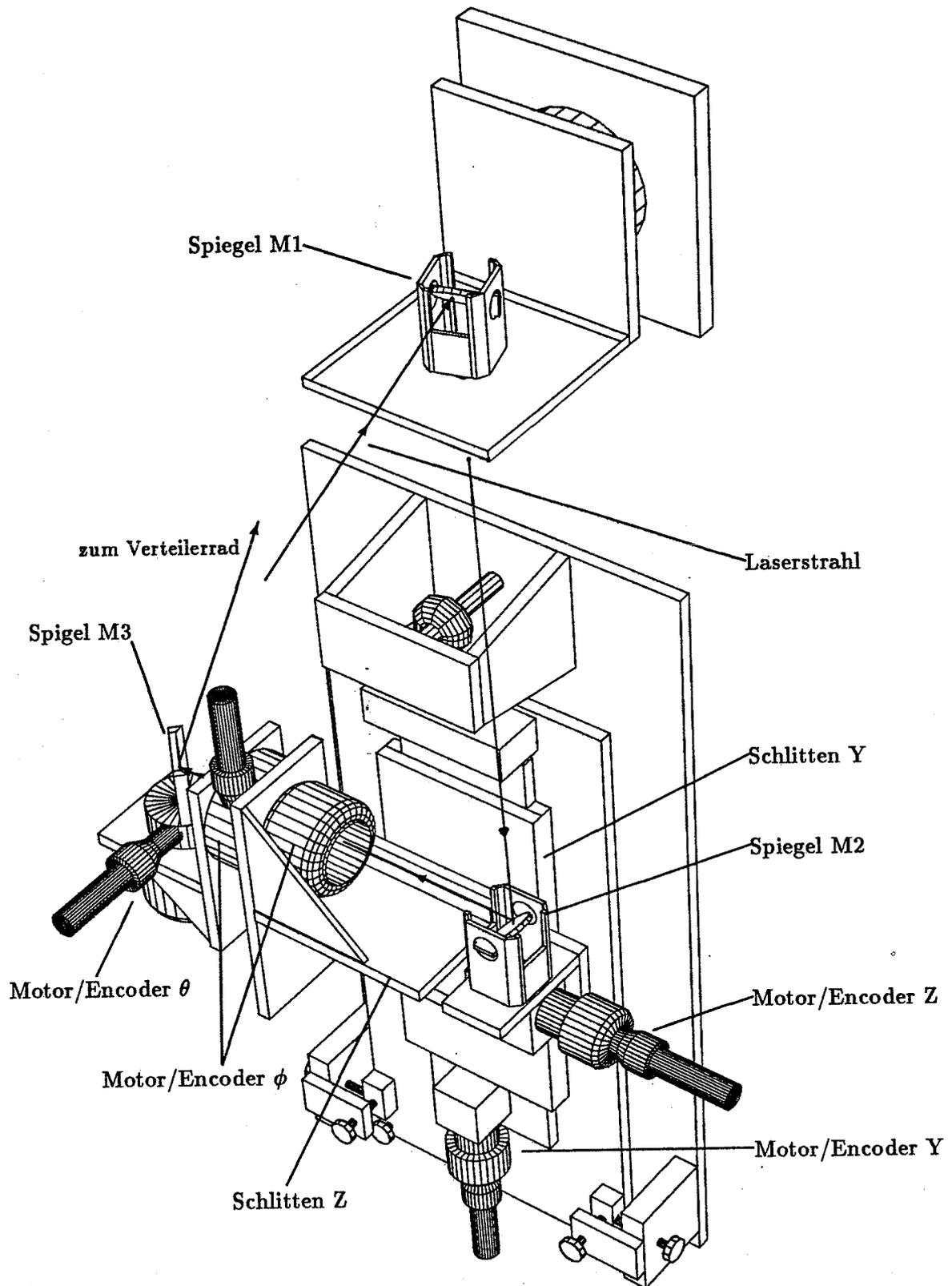


Abb. 8: Die Spiegel M1, M2 und M3, von denen M2 und M3 motorisch gefahren werden können, bilden den Superspiegel. M3 ist in θ und ϕ drehbar und sitzt auf einem Schlitten, der in z Richtung gefahren werden kann. Dieser wiederum ist zusammen mit M2 auf einem in y Richtung fahrbaren Schlitten befestigt. M1 ist fest montiert. Wenn der Laserstrahl von M1 genau in y - und von M2 genau in z -Richtung reflektiert wird, so sind die Freiheitsgrade y , z , θ , ϕ voneinander entkoppelt. Dadurch kann man den auslaufenden Strahl genau steuern.

Funktionsprinzip wird am Beispiel der Linearmaßstäbe erklärt, die Drehgeber arbeiten völlig analog.

Die blanken Linearmaßstäbe sind mit nichtreflektierenden Strichen im Abstand von $20\ \mu\text{m}$ versehen. Die Breite der Striche beträgt $10\ \mu\text{m}$.

Die Bewegungen der Linearmaßstäbe werden mit je zwei Photoschranken abgetastet [Groß90]. Diese sind um $5\ \mu\text{m}$ gegeneinander versetzt. Aus den Flanken der sinusförmigen Signale der Photoschranken wird von einer Elektronik [Eyr90], den Motorkarten (vgl. Kap. 3.7), nach je $5\ \mu\text{m}$ zurückgelegter Strecke der Schlitten ein Rechtecksignal gewonnen. Diese werden von Vorwärts-/Rückwärts-Zählern, den Istregistern, erfaßt. Die Zählrichtung wird aus der Phasenlage der Signale der Photoschranken berechnet. Aus dem Vergleich des Ist- mit einem Sollregister bestimmt ein Regelkreis die Spannung für den Motor.

Das Sollregister definiert die Sollposition des Schlittens. Wenn Ist- und Sollregister gleich sind, werden die Motoren angehalten, die Sollposition ist erreicht.

Die Istregister können von dem VME-Rechner gelesen, die Sollregister gesetzt und gelesen werden. Wenn dem Sollregister ein vom Istregister verschiedener Wert zugewiesen wird, beginnt der Regelkreis von neuem. Somit kann der Superspiegel gezielt gefahren werden.

Die Elektronik (Motorkarten) hat sich als zuverlässig erwiesen. Es geht kein Signal der Photoschranken verloren. Die Werte der Istregister, als Encoder-Werte oder -Counts bezeichnet, geben die Stellung des Superspiegels an. Die Positionen der Schlitten und die zugehörigen Encoderwerte sind immer reproduzierbar. Veränderungen in den vier Freiheitsgraden y , z , θ , ϕ werden somit von den Encodern sehr genau erfaßt: Die Schlitten werden mit einer Genauigkeit von $5\ \mu\text{m}$, die Drehungen mit einer Präzision von 0.001 Grad vom Rechnersystem gemessen und gesteuert.

In der Tabelle 1 sind die technischen Daten des Superspiegels zusammengefaßt.

Freiheitsgrad	Fahrbereich	$\frac{\text{Genauigkeit}}{\text{Count}}$	Fahrbereich in Counts
y	50 mm	$5\ \mu\text{m}$	10000
z	27 mm	$5\ \mu\text{m}$	5400
θ	49.7 Grad	0.001 Grad	49700
ϕ	50.8 Grad	0.001 Grad	50800

Tabelle 1: Fahrbereiche des Superspiegels.

3.4 Das Verteilerrad

Das Verteilerrad befindet sich jeweils direkt auf dem Eisenjoch des Magneten, also zwischen der „beweglichen Abschirmung“ und den „Muon-Endkappen“ an den Stirnseiten des OPAL-Detektors. Auf der Trägerstruktur sitzen auf einem Kreis von $467\ \text{mm}$ Radius 24 Rohrspiegel (Spiegel M4) mit Positionsmonitoren. In Abb. 9 ist ein Rohrspiegel dargestellt. Er besteht aus einem UV-Spiegel in einer rohrförmigen und um ihre Längsachse drehbaren Halterung. Zusätzlich ist der Spiegel um seine Befestigungsachse drehbar. Diese Konstruktion erlaubt es, einen Strahl aus einer beliebigen Richtung in Richtung Laserkegel zu reflektieren. In der Halterung befindet sich zudem eine Quarzplatte, die ca. 5% des Laserlichtes auf einen Positionsmonitor lenkt. Die Ortsinformation wird zum Einfädeln des Strahls und zur Korrektur der Strahlage benötigt.

Alle Spiegel wurden im Labor so vorjustiert, daß sie den vom Superspiegel kommenden Laserstrahl auf die Spiegel des Laserkegels lenken. Die zugehörigen gemessenen Ortsinformationen der Positionsmonitore definieren die Sollposition des Laserstrahls am Verteilerrad.

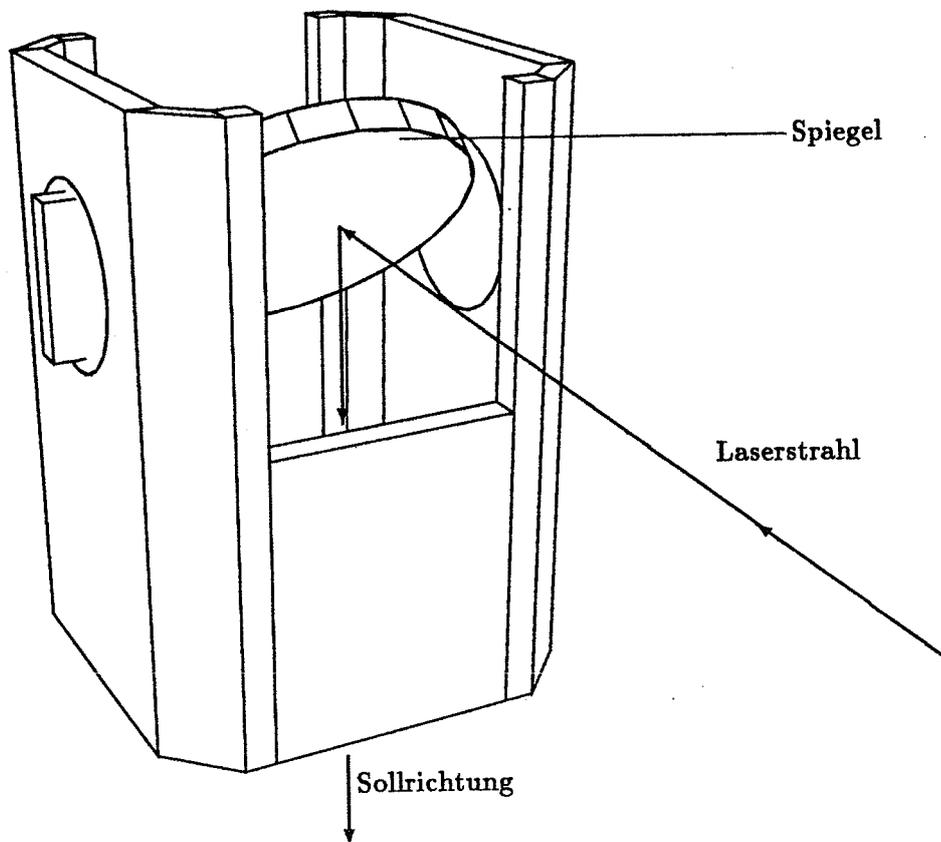


Abb. 9: Der Rohrspiegel: Der um 2 Achsen justierbare Rohrspiegel erlaubt, einen aus einer beliebigen Richtung des Raumes einlaufenden Strahl in die eingezeichnete Sollrichtung zu reflektieren. Mit dem Positionsmonitor (nicht eingezeichnet) kann dies überwacht werden.

Der genaue Aufbau des Verteilerrades wird aus Abb. 10 ersichtlich:

In der Mitte besitzt die Trägerstruktur ein kreisförmiges Loch als Durchlaß für das Strahlrohr, den Quadropolmagneten und Strukturmaterialien des Beschleunigers und Detektors. Dieses Strukturmaterial verhindert, daß die Rohrspiegel für die Sektoren 1...7 und 18...24 vom Superspiegel direkt getroffen werden können. Man erreicht sie daher indirekt über 14 Hilfsspiegel.

3.5 Der Laserkonus

Ein weiteres Spiegelsystem, *der Laserkonus*, befindet sich innerhalb des Drucktanks unmittelbar an der Jetkammer (vgl. Abb. 6). Es hat die Aufgabe, den vom Verteilerrad kommenden Laserstrahl in die Jetkammer zu leiten. In Abb. 11 ist der Laserkonus dargestellt. Hinter dem Quarzfenster des Drucktanks befindet sich ein teilreflektierender Spiegel M5 mit einer Transmission von ca. 5%. Der durchgehende Strahl trifft einen Positionsmonitor, der reflektierte wird in Richtung LEP-Strahlrohr auf den Spiegel M6 umgelenkt und läuft dann weiter auf den letzten Spiegel M7. Der Strahl trifft auf den polarisationsempfindlichen Strahlteiler, der zur Erzeugung des Doppelstrahls dient, und läuft dann durch die Eintrittsöffnung in die Jetkammer. Mit dem Positionsmonitor am Spiegel M5 wird die Position des Laserstrahls erfaßt.

Alle Spiegel wurden im Labor so vorjustiert, daß sie den Laserstrahl in die Jetkammer lenken. Die zugehörigen gemessenen Ortsinformationen der Positionsmonitore definieren die Sollposition des Laserstrahls am Laserkonus.

Um das Einfädeln des Laserstrahls zu erleichtern, befindet sich unmittelbar vor dem Spiegel M5 noch ein in vier Quadranten unterteilter Ring aus Szintillatormaterial, die Szintillationsmonitore

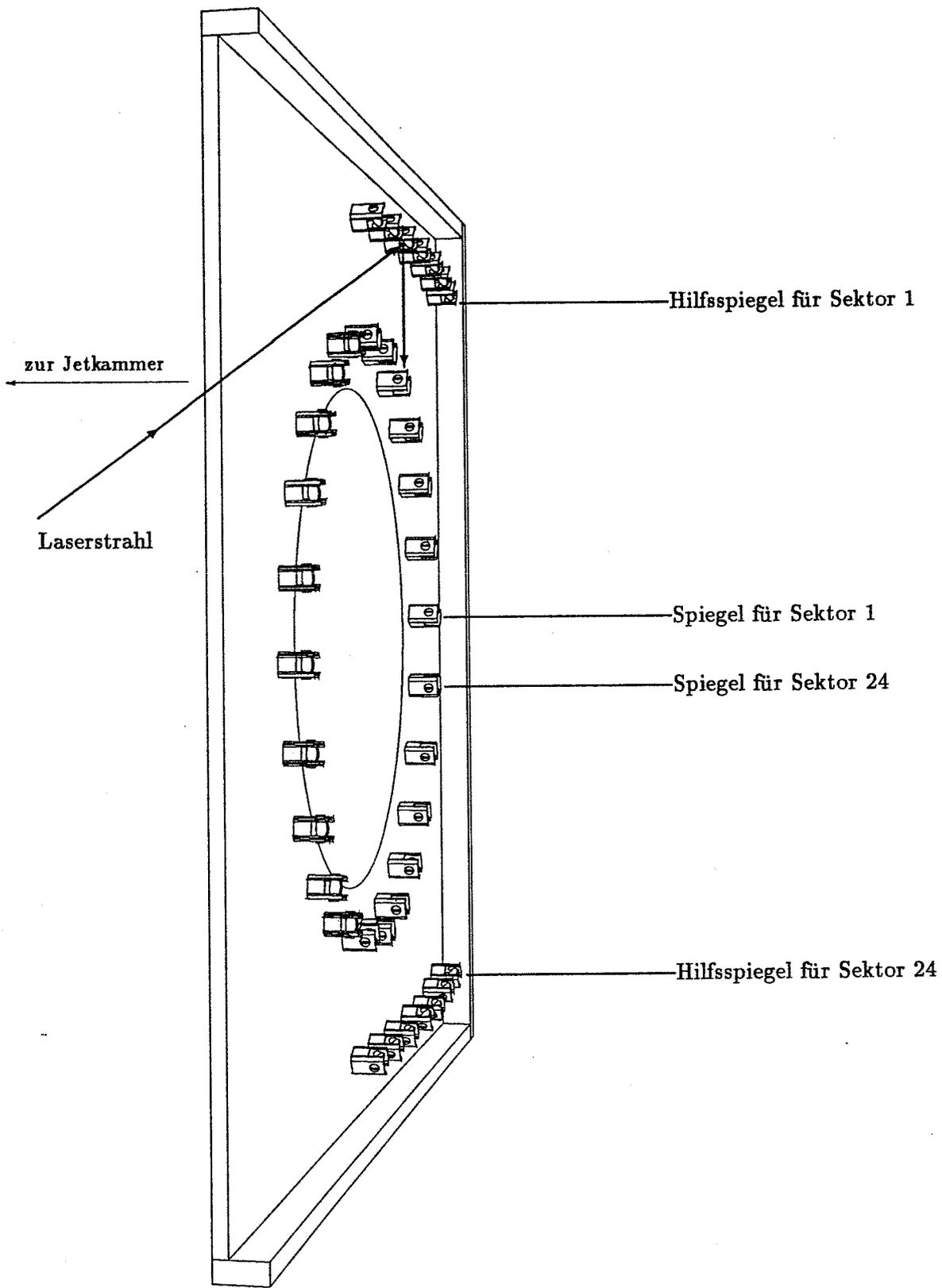


Abb. 10: Das Verteilerrad: Die Rohrspiegel des Verteilerrades lenken den Laserstrahl in Richtung Jetkammer. Um Struktur- und Detektormaterial zu umgehen, werden einige Rohrspiegel über Hilfsspiegel getroffen.

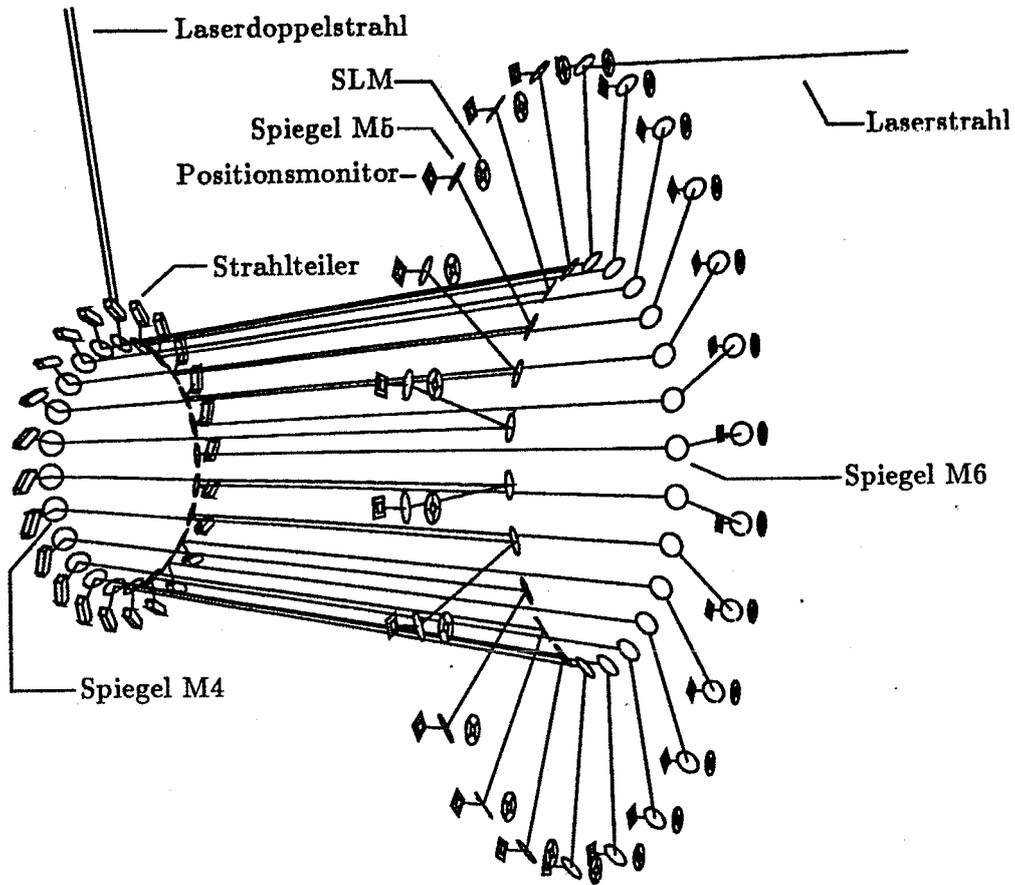


Abb. 11: Der Laserkonus: Das Spiegelsystem M5, M6, und M7 des Laserkonus lenkt den Laserstrahl durch jeweils einen der 24 Kanäle parallel zum Strahlrohr in die Jetkammer. Vor Eintritt in die Jetkammer erzeugt der Strahlteiler einen Doppelstrahl. Am Spiegel M5 sitzen ein Positionsmonitor und eine SLM zur Erfassung des Laserstrahls.

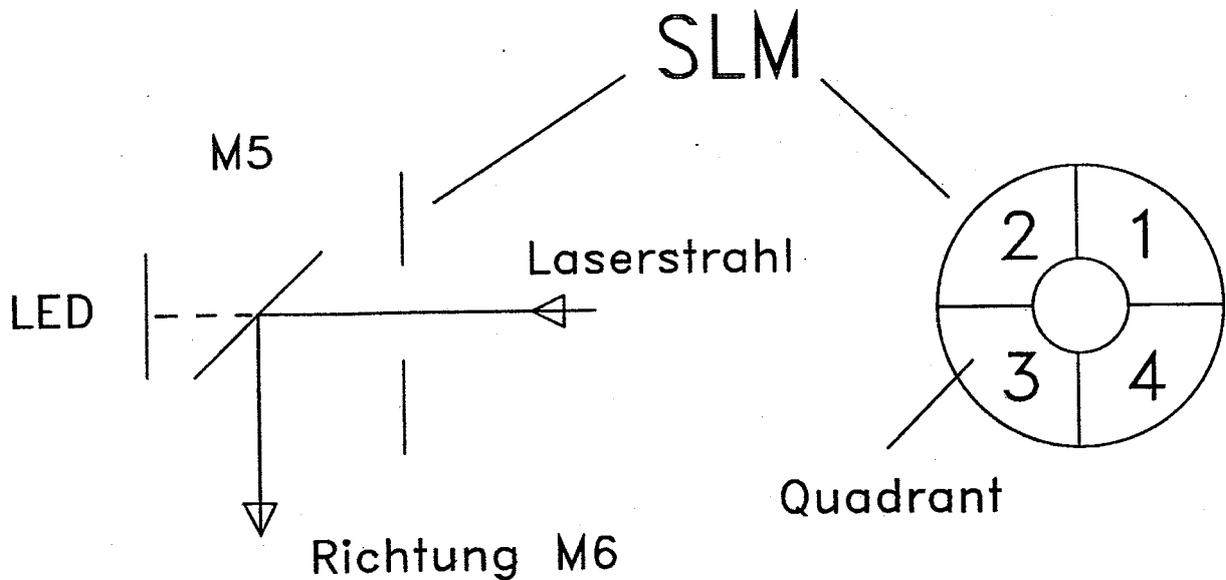


Abb. 12: Die Szintillationsmonitore (SLM) befinden sich direkt vor den Spiegeln M5 (links) und sind in vier Quadranten unterteilt.

SLM (Abb. 12). Die aktive Fläche (= Ortsauflösung der SLM) eines Quadranten beträgt ca. 1 cm^2 . Eine SLM wird dann vom Laserstrahl getroffen, wenn der Strahl den Positionsmonitor gerade nicht mehr trifft. Sie liefert somit noch bei groben Abweichungen des Strahls von der Sollstrahl-lage Informationen über den Laserstrahl. Diese Trefferinformationen werden zum Einfädeln des Laserstrahls verwendet.

3.5.1 Der polarisationsempfindliche Strahlteiler

Zwischen dem Spiegel M7 des Laserkonus und der Eintrittsöffnung zur Jetkammer befindet sich der polarisationsabhängige Strahlteiler [Hau88, Mar88] zur Erzeugung eines Laser-Doppelstrahls mit definiertem Strahlabstand. Dessen Aufbau und Funktionsprinzip ist in Abb. 13 skizziert. Der Strahlteiler besteht aus einer planparallelen Platte aus Quarz mit einer polarisationsempfindlichen Beschichtung. P-polarisiertes Licht durchläuft den Strahlteiler, während S-polarisiertes Licht von der rückseitigen polarisationsabhängigen Beschichtung reflektiert wird. Eine weitere 100% reflektierende Beschichtung auf der Vorderseite des Strahlteilers lenkt den Strahl in die Kammer. Durch Umschalten der Polarisationsebene kann somit zwischen den beiden Strahlen gewechselt werden. Schaltet man die Polarisation des Laserlichts von Schuß zu Schuß um, so erhält man einen alternierenden Doppelstrahl.

Der Abstand d (10 mm) und die Divergenz ($< 70 \mu\text{rad}$) der beiden Strahlen wurden für alle bei der OPAL-Jetkammer eingesetzten Strahlteiler mit einer Genauigkeit von $\pm 2 \mu\text{m}$ bzw. $\pm 1 \mu\text{rad}$ gemessen [Mar88]. Eine detaillierte Beschreibung des Strahlteilers ist bei [Hau88] zu finden.

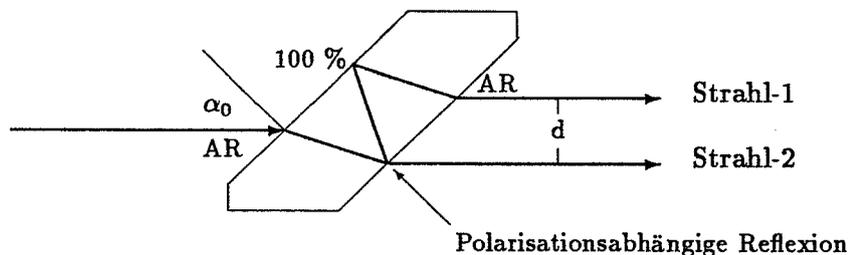


Abb. 13: Strahlteiler zur Erzeugung eines Doppelstrahls, $\alpha_0 = 49^\circ$, AR = Anti-Reflex-Beschichtung, d = Doppelstrahlabstand. Bei S-Polarisation wird Strahl-1, bei P-Polarisation nur Strahl-2 erzeugt. (Entnommen aus [Hau88].)

3.6 Die Positionsmonitore: Aufbau und Funktion

Die Positionsmonitore haben die Aufgabe, die Position des Laserstrahls in jedem der 48 Strahlengänge an jeweils zwei Stellen zu bestimmen. Da sie eine 2-dimensionale Ortsinformation liefern, mißt man mit 2 Monitoren 4 Parameter des Laserstrahls und somit dessen Strahlage. Diese Informationen werden zur Steuerung des Laserstrahls mit dem Superspiegel benötigt.

Jeweils einer der Positionsmonitore befindet sich am Verteilerrad (Spiegel M4) und am Laserkonus (Spiegel M5).

Als Positionsmonitore finden Lateral-Effekt-Dioden (LED) des Types UDT SC 100 Verwendung [Koch90]. Hierbei handelt es sich um großflächige positionsempfindliche Photodioden mit einer aktiven Fläche von $10 \times 10 \text{ mm}^2$. Sie bestehen aus einer p-dotierten dünnen Siliziumschicht auf einem n-dotierten Träger. Die Diode wird in Sperrichtung betrieben. Es bildet sich eine ladungsträgerfreie Zone. Auftreffende Photonen durchdringen die sehr dünne p-Schicht und erzeugen in der verarmten Zone Elektron-Loch-Paare, die von der angelegten Sperrspannung getrennt werden (Abb. 14). Vier Elektroden an den Rändern der p-Schicht sammeln die freigesetzte Ladung auf. Der abfließende Strom wird von einer Elektronik integriert und digitalisiert. Von dem VME-Rechner wird das digitalisierte Signal der LED in Einheiten von *counts*³ ausgelesen.

Der relative Anteil der Gesamtladung einer Elektrode hängt vom Auftreffort der Photonen ab. Setzt man ein ohmsches Verhalten der Diode voraus (konstanter Flächenwiderstand), so ergibt sich für die Position in Abhängigkeit der Ladungen (Abb. 14) die Relation

$$x_{gem} = \frac{L Q_3 - Q_1}{2 Q_3 + Q_1} \quad y_{gem} = \frac{L Q_2 - Q_4}{2 Q_4 + Q_2} \quad (3.2)$$

mit der Kantenlänge L der sensitiven Fläche, und den Ladungen Q_1 und Q_3 bzw. Q_2 und Q_4 von jeweils gegenüberliegenden Elektroden. Es hat sich gezeigt, daß die so bestimmte Position eindeutig und reproduzierbar ist. Der elektrische Ursprung stimmt zudem sehr genau mit dem geometrischen überein. Die Dioden sind somit zur Positionsbestimmung des Laserstrahls geeignet [Koch90].

3.6.1 Nichtlinearitäten der Positionsmonitore

Genauere Messungen der Dioden [Koch90] haben eine Abweichung der durch Gleichung 3.2 bestimmten Position vom tatsächlichen Auftreffpunkt der Photonen von bis zu 1 mm ergeben. Theoretische Untersuchungen haben gezeigt, daß ein einfaches 2-dimensionales Modell aus gekoppelten RC-Gliedern (Abb. 15) diese Abweichungen im Rahmen der Meßgenauigkeit erklärt. Für einen Laserstrahl von verschwindender Ausdehnung des Strahlprofils (Intensitätsprofil entspricht einer δ -Funktion) ist die Lösung in geschlossener Form in [Koch90] angegeben. In dem mit

$$u = \frac{x}{L} + 0.5 \quad v = \frac{y}{L} + 0.5 \quad (3.3)$$

auf $[0, 1] \times [0, 1]$ normierten Koordinatensystem der LED liefert die erste Näherung – für die gemessene Position als Funktion der tatsächlichen Position – die Abhängigkeit [Koch90]:

$$u_{gem}(u) = u - V_k(u) \quad v_{gem}(v) = v - V_k(v), \quad (3.4)$$

mit der Verzerrung

$$V_k(w) = k \frac{(1 - 2w) \sin(\pi w)}{1 - 2k \sin(\pi w)}. \quad (3.5)$$

³Willkürliche Einheit.

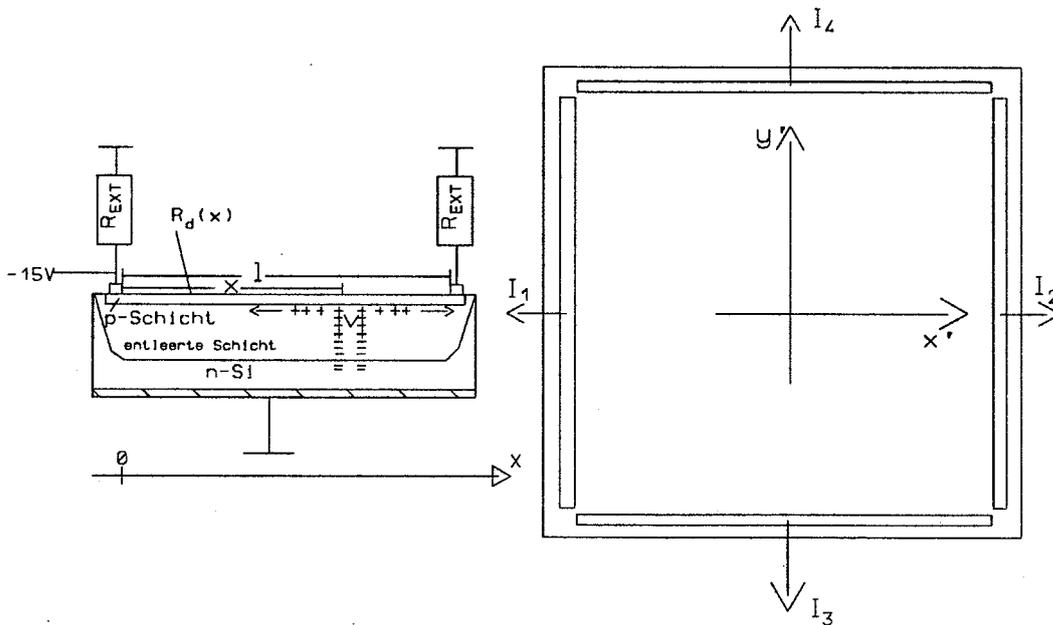


Abb. 14: Photoeffekt bei Lateral-Effekt-Dioden (LED): Photonen erzeugen Elektron-Loch-Paare in der Sperrschicht. Diese werden von der Sperrspannung getrennt. Über die Elektroden werden die Teilströme abgegriffen. Aus den integrierten Strömen wird der Auftreffort der Photonen berechnet. (Entnommen aus [Koch90].)

Die Funktion $V_k(u)$ gibt die Verzerrung an der Stelle u an. Sie ist punktsymmetrisch zum Punkt $u = 0.5$. Dies ist auch aufgrund der Symmetrie der LED auch zu erwarten.

Der Parameter k hängt vom Dioden- und Eingangswiderstand der Ausleselektronik ab und ist ein Maß für die maximale Verzerrung. Die Koordinaten u und v sind entkoppelt (vgl. Gleichung 3.4), es liegt somit ein quasi eindimensionales Problem vor. Im folgenden wird daher die Diskussion am Beispiel der Koordinate u weitergeführt. Für den bei OPAL verwendeten Diodentyp zusammen mit der nachfolgenden Elektronik wird in [Koch90] ein Wert von $k = 0.184 \pm 0.005$ angegeben. In Abb. 16 ist die Funktion $V_k(u)$ für $k = 0.15, 0.17, 0.184, 0.2$ bis 0.3 in Schritten von jeweils 0.02 dargestellt.

3.6.2 Die Linearisierung

In Kapitel 4 wird ein Verfahren zur Korrektur der Strahlage des Laserstrahls vorgestellt. Für die Stabilität dieses Verfahrens ist ein lineares Verhalten der Positionsmonitore wichtig. Daher müssen die gemessenen Koordinaten entzerrt werden. Dazu muß Gleichung 3.4 invertiert werden.

Diese ist aber nicht algebraisch invertierbar. In [Koch90] wird die Iteration der Fixpunktgleichung

$$u = f(u) \quad f(u) \equiv u_{gem} + V_k(u), \quad (3.6)$$

also

$$u_{i+1} = u_{gem} + V_k(u_i); \quad u_0 = u_{gem} \quad (3.7)$$

vorgeschlagen. Im folgenden wird die Konvergenz des Iterationsverfahrens gezeigt und anschließend diskutiert:

Da $\frac{du_{gem}(u)}{du} > 0$, ist u_{gem} streng monoton steigend. Ferner ist $u_{gem}(u)$ wegen $u_{gem}(0) = 0$ in $[0, 1]$

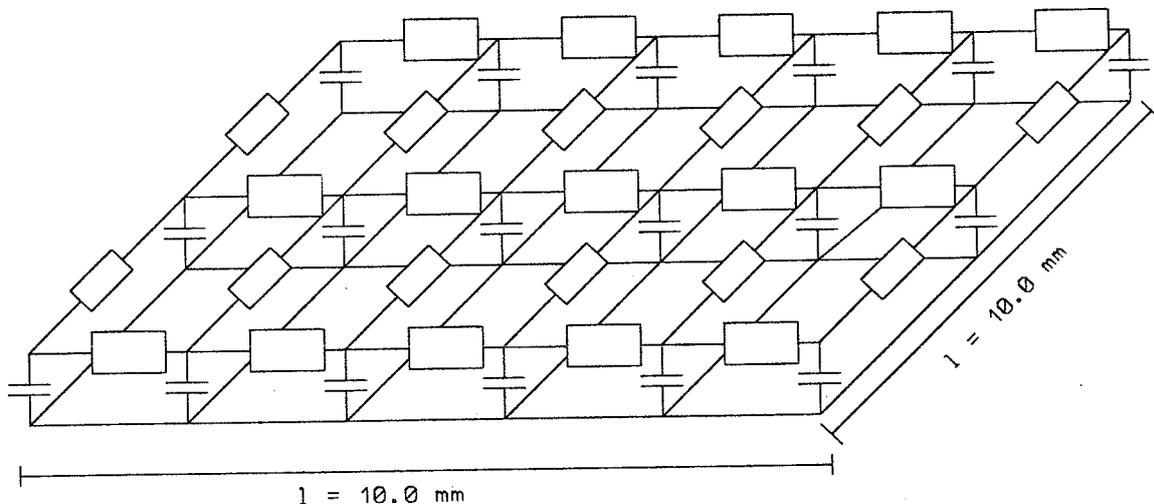


Abb. 15: Zweidimensionales Modell der Lateral-Effekt-Diode mit einem RC-Netz. (Entnommen aus [Koch90].)

und $u_{gem}(1) = 1$ beschränkt. Somit existiert die Inverse für alle $u_{gem} \in [0, 1]$. Für $k=0.184$ gilt zudem

$$q(u) \equiv \left| \frac{dV_k(u)}{du} \right| < 0.6 . \quad (3.8)$$

Damit sind alle hinreichenden Bedingungen des Banachschen Fixpunktsatzes [For83, Bro84] erfüllt, d.h. $u(u_{gem})$ ist eine kontrahierende Abbildung und die Iteration konvergiert gegen den Fixpunkt. Eine Abschätzung des Fehlers nach i Iterationen ergibt sich aus dem Mittelwertsatz der Differentialrechnung zu

$$|u_i - u| \leq q^i |u_0 - u| . \quad (3.9)$$

Das Verfahren konvergiert somit für kleine q sehr schnell.

In Abb. 17 ist die Ableitung der Verzerrung $V_k(u)$ für $k = 0.15, 0.17, 0.184, 0.2$ bis 0.3 dargestellt. Man erkennt, daß für große q , also $q \geq 0.5$, die Verzerrung $|u_0 - u|$ kleiner als 0.05 ist, andererseits ist aber für Bereiche mit $|u_0 - u| \geq 0.05$ die Ableitung q kleiner als 0.5 . Somit ergibt sich nie die besonders ungünstige Konstellation eines großen q bei gleichzeitig großem Fehler. In der Tabelle 2 ist der Fehler $|u_i - u|$ für $i = 0 \dots 8$ und $u = 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.45$ für verschiedene k dargestellt. Das Verfahren zur Linearisierung erweist sich als numerisch stabil und konvergiert für $k \leq 0.184$ sehr schnell. Eine absolute Genauigkeit von $|u_i - u| \leq 0.001$ ist nach 6 Iterationen garantiert.

3.6.3 Weitere Einflüsse auf die Positionsbestimmung

In Kapitel 3.6.1 wurde bei der Diskussion der Nichtlinearität der LED die endliche Ausdehnung des Laserstrahls vernachlässigt. Eine Abschätzung liefert die Faltung der Verzerrung mit dem gaußförmigen

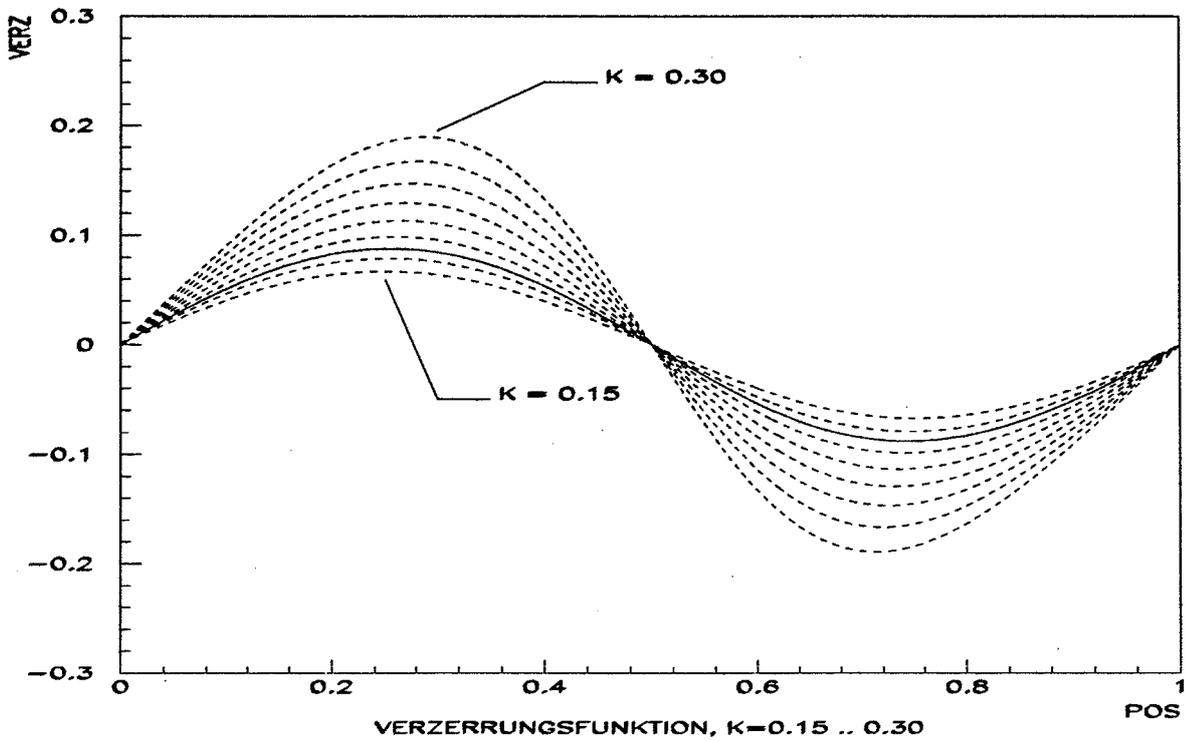


Abb. 16: Die Abweichung $V_k(u)$ der gemessenen Position u_{gem} vom tatsächlichen Auftreffort u der Photonen hängt stark vom Parameter k ab. Für die bei OPAL verwendeten Dioden + Elektronik wurde $k = 0.184$ (durchgezogene Linie) gemessen.

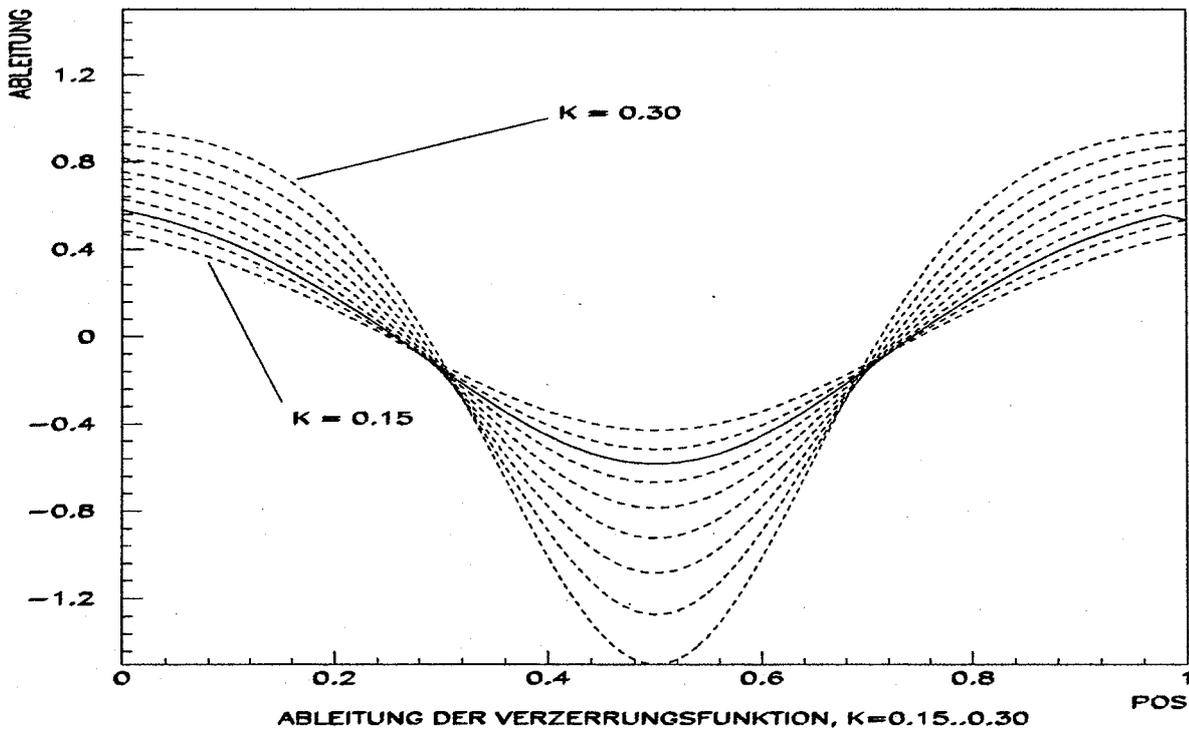


Abb. 17: Die Ableitung der Korrekturfunktion $V_k(u)$ sollte für eine schnelle Konvergenz der Iteration möglichst klein sein. Man erkennt durch Vergleich mit Abb. 16, daß dies besonders an den Stellen mit großer Verzerrung erfüllt ist. (Durchgezogene Linie: $k = 0.184$)

Para. k	Pos. u	$ u_i - u $								
		i = 0	1	2	3	4	5	6	7	8
0.150	0.050	0.02218	0.00945	0.00395	0.00164	0.00068	0.00028	0.00012	0.00005	0.00002
	0.100	0.04087	0.01501	0.00520	0.00176	0.00059	0.00020	0.00007	0.00002	0.00001
	0.200	0.06423	0.01261	0.00174	0.00022	0.00003	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	0.300	0.06410	0.00297	0.00039	0.00005	0.00001	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	0.400	0.03992	0.01222	0.00430	0.00146	0.00050	0.00017	0.00006	0.00002	0.00001
	0.450	0.02105	0.00833	0.00341	0.00138	0.00056	0.00023	0.00009	0.00004	0.00002
0.184	0.050	0.02749	0.01474	0.00778	0.00407	0.00212	0.00110	0.00057	0.00029	0.00015
	0.100	0.05132	0.02452	0.01115	0.00493	0.00215	0.00093	0.00040	0.00017	0.00008
	0.200	0.08280	0.02436	0.00527	0.00100	0.00018	0.00003	0.00001	0.00000	0.00000
	0.300	0.08479	0.00042	0.00006	0.00001	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	0.400	0.05384	0.02052	0.00979	0.00433	0.00199	0.00090	0.00041	0.00018	0.00008
	0.450	0.02855	0.01503	0.00838	0.00455	0.00251	0.00137	0.00075	0.00041	0.00023
0.200	0.050	0.03004	0.01769	0.01028	0.00592	0.00340	0.00194	0.00111	0.00063	0.00036
	0.100	0.05642	0.03006	0.01534	0.00762	0.00373	0.00181	0.00087	0.00042	0.00020
	0.200	0.09222	0.03212	0.00850	0.00194	0.00042	0.00009	0.00002	0.00000	0.00000
	0.300	0.09569	0.00258	0.00039	0.00006	0.00001	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	0.400	0.06140	0.02538	0.01388	0.00683	0.00357	0.00181	0.00093	0.00048	0.00025
	0.450	0.03265	0.01944	0.01244	0.00766	0.00484	0.00301	0.00189	0.00118	0.00074
0.220	0.050	0.03326	0.02182	0.01417	0.00913	0.00585	0.00374	0.00238	0.00152	0.00096
	0.100	0.06295	0.03801	0.02218	0.01262	0.00707	0.00392	0.00216	0.00119	0.00065
	0.200	0.10465	0.04428	0.01491	0.00429	0.00116	0.00030	0.00008	0.00002	0.00001
	0.300	0.11054	0.00885	0.00124	0.00020	0.00003	0.00001	0.00000	0.00000	0.00000
	0.400	0.07196	0.03225	0.02083	0.01155	0.00708	0.00411	0.00247	0.00145	0.00087
	0.450	0.03843	0.02643	0.02000	0.01425	0.01066	0.00771	0.00572	0.00417	0.00308

Tabelle 2: Nichtlinearität der Lateral-Effekt-Diode nach i Iterationen: Die Abweichung des Wertes u_i vom Sollwert u nach i Iterationen hängt sowohl vom Wert des Verzerrungsparameters k als auch von der Position u ab. Für $k=0.184$ ist die Abweichung für alle Positionen u nach 6 Iterationen kleiner als 0.001. (u bezeichnet die auf $[0,1]$ normierte Position.)

gen Laserstrahlprofil. Die Rechnung zeigt jedoch, daß dieser Effekt mit nur weniger als 1% beiträgt und somit vernachlässigt werden kann.

Wichtig sind Abschneideeffekte: Trifft der Laserstrahl die LED im Randbereich, so wird ein Teil des Laserspots ausgeblendet und trifft daher nicht auf die sensitive Fläche der LED. Dadurch verschiebt sich der Ladungsschwerpunkt der in der LED freigesetzten Photoelektronen. Man mißt somit eine zum Zentrum der LED hin verschobene Position. Andererseits erzeugt ein zum Teil ausgeblendeter Laserstrahl weniger Photoelektronen, so daß man durch einen geeigneten Schnitt auf die gemessene Ladung solche Positionen erkennen kann.

Weitere Einflüsse ergeben sich aus dem Funktionsprinzip des Lasers und der Frequenzverdoppelung [Schr89]. Um diesen Einfluß zu untersuchen, wurde im Labor mit einem Nd:YAG-Laser auf eine LED geschossen und die Ladung und Position gemessen. Der Durchmesser des Laserstrahls betrug ca. 2mm. An die Daten der Ortsverteilung wurde eine Gaussfunktion angepaßt. Sie beschreibt den Verlauf der Daten ausgezeichnet. Das Ergebnis der Messung ist in Abb. 18 dargestellt:

- Die Laserintensität schwankt von Schuß zu Schuß sehr stark [Hau88, Schr89] und damit auch die mit der LED gemessene Ladung.
Eine geringe Ladung führt zu großen Fehlern bei der Bestimmung der Trefferposition. Daher

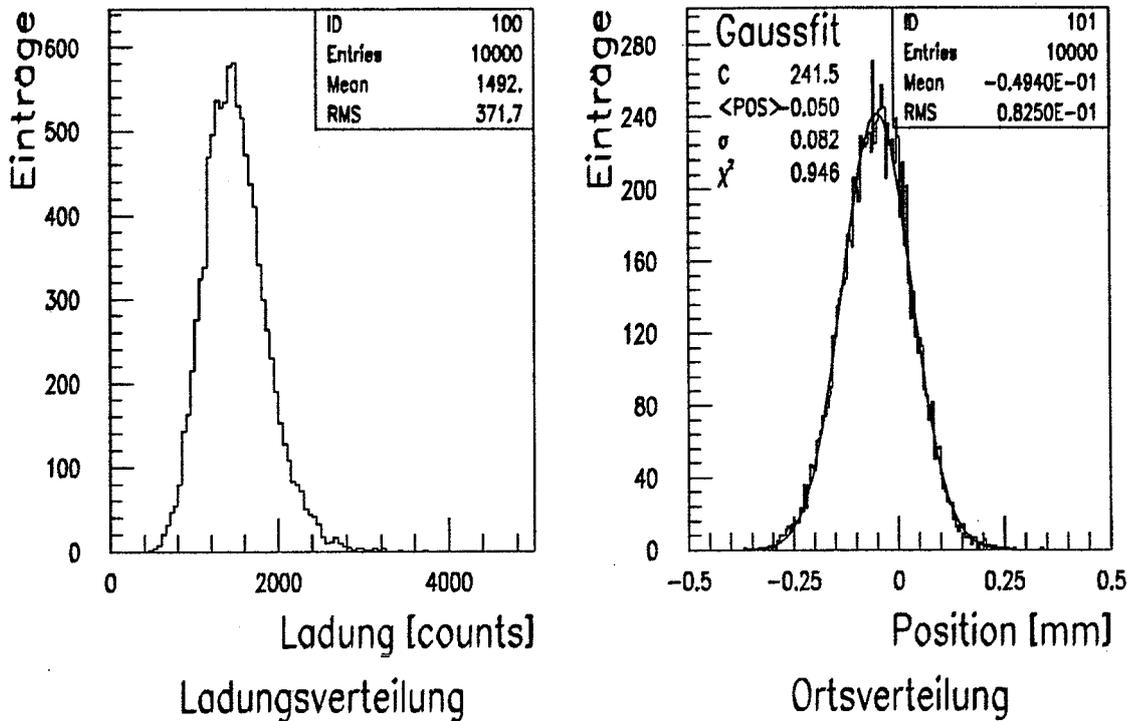


Abb. 18: Messung der Ladungs- und Ortsverteilung

wird für die Positionsbestimmung eine minimale Ladung von 200 counts verlangt. Die Intensität eines Laserschusses kann auch derart hoch sein, daß die LED übersteuert wird. Dieser Fall wird durch einen Schnitt auf die maximale Ladung unterdrückt [Rol89].

- Der Schwerpunkt des Laserstrahlprofils schwankt von Schuß zu Schuß. Es wurde ein RMS von ca. $80 \mu\text{m}$ gemessen. Die Position wird daher als Mittelwert über mehrere Schüsse gebildet. Es werden je nach Anforderung 5 bis 40 gute Schüsse genommen. Dadurch wird eine Genauigkeit der Ortsbestimmung von $36 \mu\text{m}$ bis $13 \mu\text{m}$ erreicht.

3.7 Die Elektronik zur Steuerung des Kalibrationssystems

Die Abbildung 19 zeigt die Blockstruktur der Elektronik: Das Herz des Systems bildet ein VME-Modul mit einer Mikroprozessorkarte VIP-68000 [VIP89]. Dieser Rechner steuert und überwacht alle Komponenten des Laser-Kalibrationssystems. Die Elektronik besteht aus den folgenden Funktionseinheiten:

Motorkarten: Diese führen die Befehle des Mikroprozessors aus und fahren die Motoren auf vorgegebene Encoderwerte. Aktuelle Encoderpositionen stehen dem Rechner zur Verfügung. Jeder Motor wird von einer eigenen Karte gesteuert.

LED-Box: Sie liest die Lateral-Effekt-Dioden aus und stellt die zur Positionsbestimmung benötigten Ladungen Q_1 bis Q_4 für jede LED zur Verfügung. Auch werden hier die Signale der Szintillationsmonitore (SLM) ausgelesen. Der Aufbau und das Funktionsprinzip der LED-Box sind in [Koch90] zu finden.

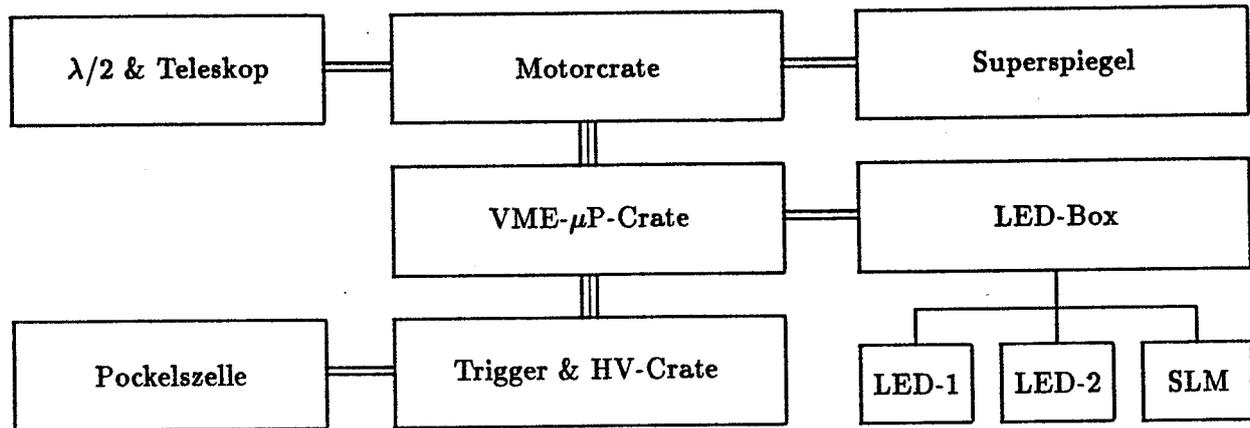


Abb. 19: Blockschaltbild der Elektronik

Triggereinheit: Sie bereitet das Signal der schnellen Photodiode zu einem Triggersignal auf. Sperren und Setzen des Triggers sind möglich. Dieses Triggersignal wird bei der Kalibration mit Laser auch zum Start der Ausleseelektronik der Jetkammer verwendet.

Hochspannungseinheit: Sie liefert die Hochspannung für die Photodiode und die Pockelszelle.

Laser-Kontrolleinheit: Sie steuert und überwacht die Funktionen des Lasers.

Eine detaillierte Beschreibung der Elektronik ist in [Las90] zu finden.

4 Die Steuerung des Lasersystems

Zur Kalibration der OPAL-Jetkammer muß der Laserstrahl, wie im vorausgehenden Kapitel eingehend diskutiert wurde, in die Jetkammer gelenkt werden. Auf beiden Seiten des Detektors wird der Laserstrahl vom Superspiegel über das Verteilerrad und den Laserkonus in jeweils einen der 24 Sektoren der Jetkammer geführt. Am Laserkonus und am Verteilerrad sind Positionsmonitore zur Bestimmung der Strahlage montiert. Bei der Justierung der Spiegel im Labor wurden Sollpositionen (LED-Positionen) des Laserstrahls gemessen (vgl. Kap. 3.4 und 3.5). Diese definieren die Sollstrahlage des Laserstrahls.

Ein VME - Mikroprozessor steuert und überwacht den Laser, den Superspiegel und die Elemente der optischen Bank. Darüber hinaus übernimmt dieser Rechner das Auslesen der LED-Daten.

Im folgenden werden zunächst der Algorithmus zur Optimierung der Strahlage und zum Einfädeln des Laserstrahls vorgestellt. Anschließend werden die Struktur der Online-Software zur Steuerung des Laser-Kalibrationsystems und die Hilfsprogramme zu deren Entwicklung beschrieben.

4.1 Der Algorithmus zur Korrektur der Strahlage

In Kapitel 2 ist der Aufbau des Lasersystems dargestellt worden. Zur Erfassung der Strahlage sind an je zwei Stellen für jeden der 48 Strahlengänge Positionsmonitore angebracht. Der Laserstrahl muß über eine Reihe von Spiegeln und eine Distanz von ca. 8m auf weniger als 0.5mm genau gesteuert werden. Der aktuelle Strahl - *der Iststrahl* - muß in den *Sollstrahl* überführt werden. Der Sollstrahl ist durch die Sollpositionen⁴ des Laserstrahls auf den LEDs definiert.

In der Abb. 20 ist der Strahlengang vom steuerbaren Spiegel (M3) zu den Positionsmonitoren und der Trefferfläche (F) für einen Sektor schematisch dargestellt. Da planare Spiegel die Strahlparameter - Winkel ($\delta\theta$, $\delta\phi$) und Verschiebung (δz , δy) zwischen Ist- und Sollstrahl - bei Reflektion nicht ändern, kann man den Strahlengang auf den in Abb. 21 skizzierten Fall mit Superspiegel und zwei Referenzebenen reduzieren:

Die Strahlage wird in zwei Referenzebenen durch die Koordinaten $\begin{pmatrix} y_1 \\ z_1 \end{pmatrix}$ und $\begin{pmatrix} y_2 \\ z_2 \end{pmatrix}$ erfaßt, d bezeichnet den Abstand der Ebenen voneinander, s sei der Abstand zwischen Superspiegel und der Referenzebene 1. Aus der Skizze werden die notwendigen Korrekturen ersichtlich: Zunächst wird der Superspiegel so gedreht, daß der Iststrahl parallel zum Sollstrahl läuft. Durch eine anschließende Verschiebung wird dann der Iststrahl in den Sollstrahl überführt. Dies ist möglich, da der Laserstrahl den Spiegel M3 im Schnittpunkt seiner Drehachsen trifft (vgl. Kap. 3.3).

Zur Korrektur der z -Koordinate auf der Trefferfläche wird Iststrahl um den Winkel $-\delta\theta$ und um die Strecke

$$-\delta z = -(z_1 - s\delta\theta)$$

verschoben. Analog muß zur Korrektur der y -Koordinate der Strahl um den Winkel $-\delta\phi$ gedreht und um die Strecke

$$-\delta y = -(y_1 - s\delta\phi)$$

versetzt werden. Die Winkel $\delta\theta$ und $\delta\phi$ erhält man aus

$$\begin{aligned} \delta\theta &= \arctan \frac{z_2 - z_1}{d} \\ &\approx \frac{z_2 - z_1}{d} \end{aligned}$$

⁴Siehe Kap. 3.4 und 3.5.

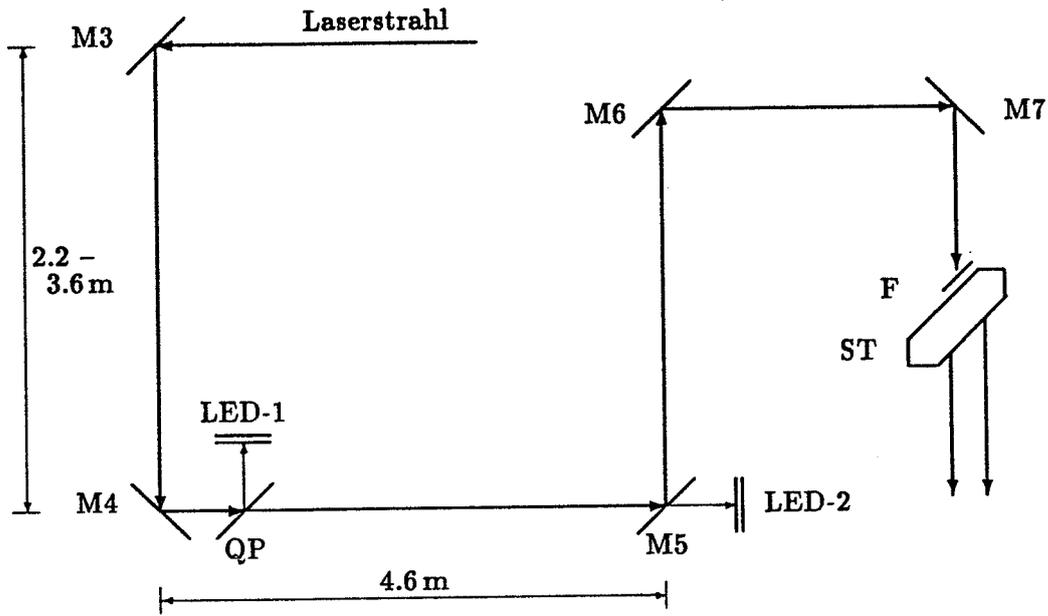


Abb. 20: Prinzip des Strahlengangs vom steuerbaren Spiegel (M3), den Positionsmonitoren (LED-1, LED-2) und der Trefferfläche (F) über die Spiegel M3 bis M7 zum Strahlteiler (ST). Die Quarzplatte (QP) koppelt einen Teil der Laserintensität auf den Positionsmonitor LED-1 aus, während M5 als teildurchlässiger Spiegel den Laserstrahl direkt auf die LED-2 fallen läßt.

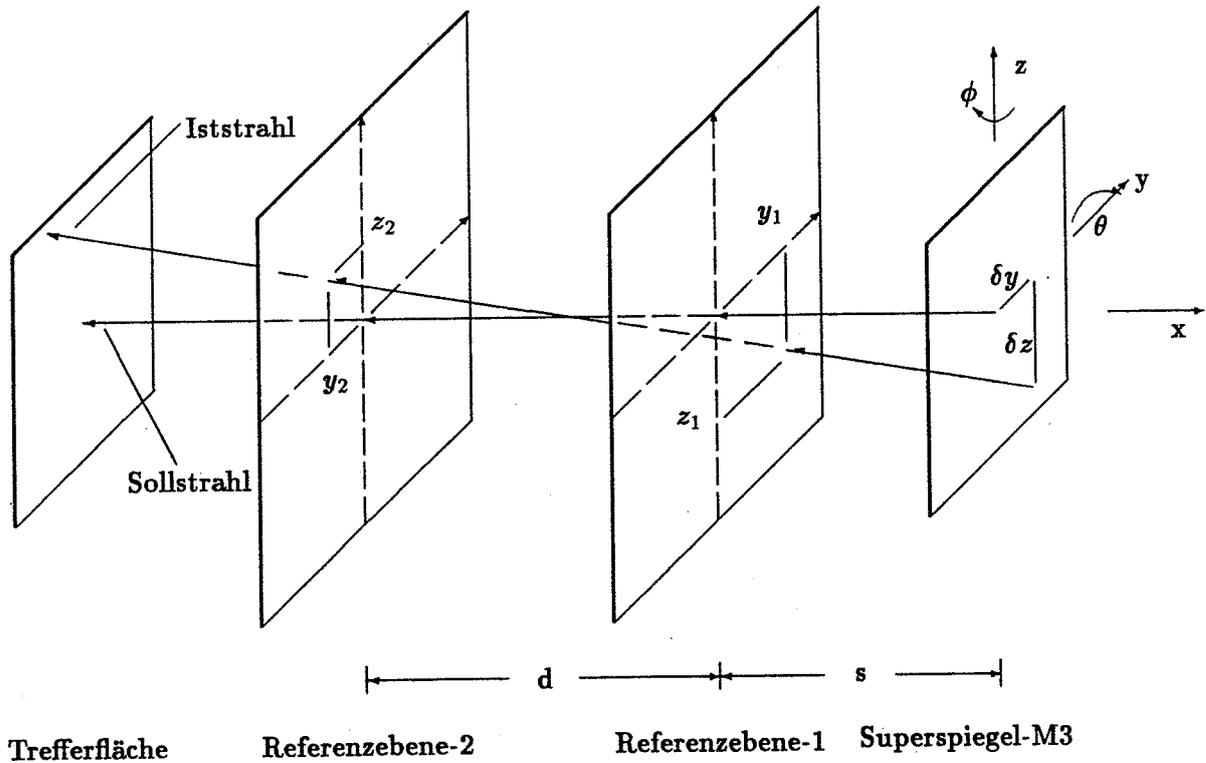


Abb. 21: Der Strahl ist durch Punkte in zwei Referenzebenen eindeutig beschrieben; d ist der Abstand der Referenzebenen, s der Abstand der ersten Ebene zum Superspiegel.

$$\begin{aligned}\delta\phi &= \arctan \frac{y_2 - y_1}{d} \\ &\approx \frac{y_2 - y_1}{d}.\end{aligned}$$

Die Näherungen ergeben sich aus $|z| \leq 5 \text{ mm}$ bzw. $|y| \leq 5 \text{ mm}$, $s \approx 3 \text{ m}$ und $d \approx 4.6 \text{ m}$. Um nun die Referenzebenen 1 und 2 mit den Lateral-Effekt-Dioden 1 und 2, also den Positionsmonitoren, identifizieren zu können, muß man die Rotation der Koordinatensysteme der Positionsmonitore gegen das als Referenzsystem benutzte z - y -Koordinatensystem des Superspiegels berücksichtigen. Zudem geht die Sollstrahlage nicht notwendigerweise durch den Ursprung der Positionsmonitore. Insgesamt ergeben sich somit folgende Gleichungen zur Berechnung der Korrekturen $\delta\theta$, $\delta\phi$, δz , und δy [Mar88], wobei $\begin{pmatrix} u_1 \\ v_1 \end{pmatrix}$ und $\begin{pmatrix} u_2 \\ v_2 \end{pmatrix}$ die gemessenen – und nach dem in Kapitel 3 beschriebenen Verfahren linearisierten – LED Koordinaten sind:

$$\begin{pmatrix} z_1 \\ y_1 \end{pmatrix} = R_1 \left(\begin{pmatrix} u_1 \\ v_1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} u_1^{\text{soll}} \\ v_1^{\text{soll}} \end{pmatrix} \right) \quad (4.10)$$

$$= -R_1 \begin{pmatrix} \delta u_1 \\ \delta v_1 \end{pmatrix} \quad (4.11)$$

$$\begin{pmatrix} z_2 \\ y_2 \end{pmatrix} = R_2 \left(\begin{pmatrix} u_2 \\ v_2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} u_2^{\text{soll}} \\ v_2^{\text{soll}} \end{pmatrix} \right) \quad (4.12)$$

$$= -R_2 \begin{pmatrix} \delta u_2 \\ \delta v_2 \end{pmatrix} \quad (4.13)$$

Und schließlich die Korrekturen zur Steuerung des Superspiegels:

$$\delta\theta = \frac{z_2 - z_1}{d} \quad (4.14)$$

$$\delta\phi = \frac{y_2 - y_1}{d} \quad (4.15)$$

$$\delta z = (z_1 - s\delta\theta) \quad (4.16)$$

$$\delta y = (y_1 - s\delta\phi). \quad (4.17)$$

Mit den 2×2 Matrizen R_1 und R_2 wird die Orientierung der Positionsmonitore und mit $\begin{pmatrix} u_1^{\text{soll}} \\ v_1^{\text{soll}} \end{pmatrix}$ und $\begin{pmatrix} u_2^{\text{soll}} \\ v_2^{\text{soll}} \end{pmatrix}$ die von $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ abweichende Sollposition berücksichtigt.

Die mit Gleichungen 4.14–4.17 bestimmten Größen werden nach Umrechnung in Zählerschritte (Encoderwerte, Tabelle 1) direkt zur Steuerung der entsprechenden Motoren des Superspiegels eingesetzt⁵.

Man kann wegen der mechanischen Toleranzen, den Fehlern in den Abständen s und d (ca. 1 cm) und bei der Messung der Strahlposition und Berechnung der Matrizen nicht erwarten, daß mit der einmaligen Ausführung der beschriebenen Korrekturen der Strahl mit der geforderten Genauigkeit von 0.5 mm auf den Strahlteiler positioniert werden kann. Daher müssen die Korrekturen mehrfach angewendet werden (Iteration).

In der Abb. 22 ist diese Iteration als Flußdiagramm dargestellt:

Zunächst wird der Superspiegel auf die vorgespeicherten Sollwerte gefahren. Der Laserstrahl wird vom Superspiegel auf einen der Rohrspiegel des Verteilerrades und somit in einen der 24 Sektoren der Jetkammer gelenkt. Die Positionsmonitore werden ausgelesen und die gemessenen Koordinaten linearisiert. Anschließend wird die oben beschriebene Korrektur mit neuen Encoderwerten für die

⁵Dabei ist zu beachten, daß eine Änderung im Winkel θ des Spiegels M3 die doppelte Winkeländerung im auslaufenden Strahl bewirkt.

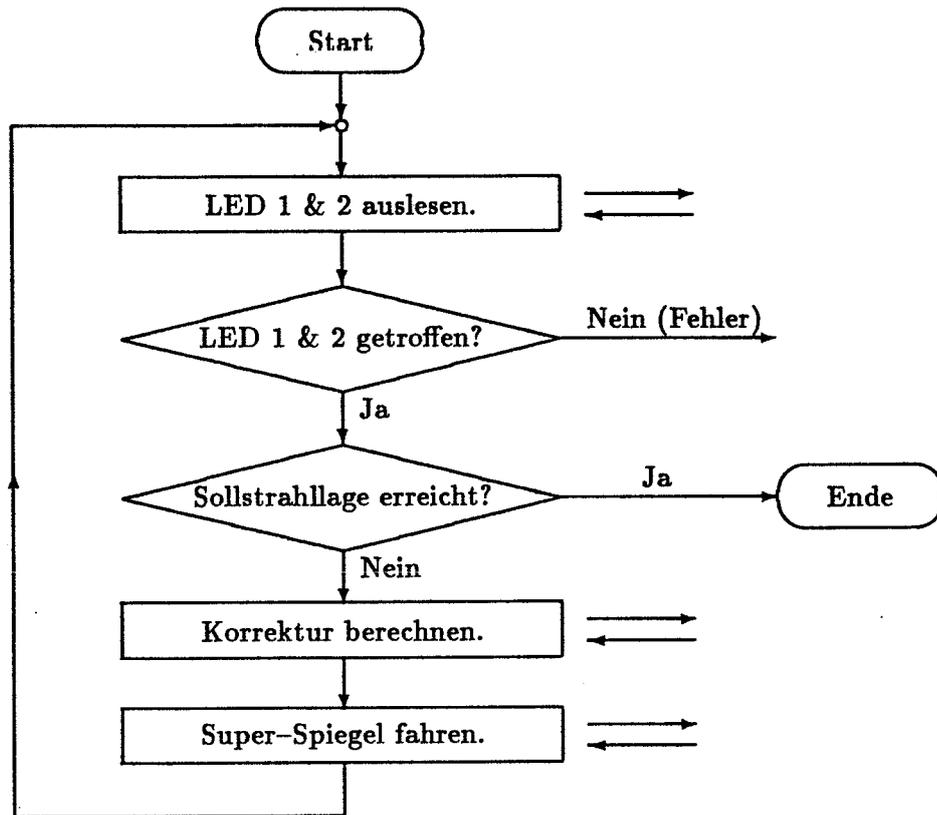


Abb. 22: Flußdiagramm der Strahlkorrektur: Die Pfeile deuten den Aufruf von Unterprogrammen an.

Stellung des Superspiegels berechnet und ausgeführt, um dann erneut die LED auszulesen, usw. Die Iteration wird abgebrochen, wenn auf beiden Positionsmonitoren der Abstand zur Sollposition eine vorgegebene Schranke⁶ unterschreitet. Die Sollstrahlage ist damit erreicht.

4.1.1 Bestimmung der Steuermatrizen

Für jeden Sektor und für jede Seite muß somit ein Satz von Steuermatrizen R_1 und R_2 bestimmt werden. Dazu wurde folgendes Verfahren gewählt:

Ausgehend von einer Ausgangsposition fährt man den z-Schlitten des Superspiegels um eine gewisse Strecke δz und mißt die Verschiebung der Trefferposition $\begin{pmatrix} \delta u_z \\ \delta v_z \end{pmatrix}$. Mit der zu R inversen Matrix

$$R^{-1} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \quad (4.18)$$

gilt somit:

$$\begin{pmatrix} \delta u_z \\ \delta v_z \end{pmatrix} = R^{-1} \begin{pmatrix} \delta z \\ 0 \end{pmatrix} = \delta z \begin{pmatrix} a \\ c \end{pmatrix} \quad (4.19)$$

⁶Derzeit wird ein Wert von $150 \mu\text{m}$ verwendet.

und daher

$$a = \delta u_z / \delta z \quad (4.20)$$

$$c = \delta v_z / \delta z. \quad (4.21)$$

Völlig analog erhält man durch Fahren des y-Schlittens um δy und Messung der Verschiebung $\begin{pmatrix} \delta u_y \\ \delta v_y \end{pmatrix}$ die Matrixelemente b und d :

$$b = \delta u_y / \delta y \quad (4.22)$$

$$d = \delta v_y / \delta y. \quad (4.23)$$

Die Matrizen R_1 und R_2 wurden nach dem geschilderten Verfahren sowohl mit einem Simulationsprogramm bestimmt, das alle Komponenten des Laser-Kalibrationssystems enthält, als auch direkt am fertig aufgebauten System gemessen.

In der Tabelle 3 sind eine mit der Simulation berechnete und die zugehörige gemessene Matrix dargestellt. Es zeigte sich eine gute Übereinstimmung. Die vorhandenen kleinen Differenzen hängen von der Ausgangsposition und dem Verzerrungsparameter k (vgl. Kap. 2.3) ab.

Aus dem Vergleich zwischen den gemessenen und den mit dem Simulationsprogramm bestimmten Matrizen konnten auch einige kleinere Fehler beim Aufbau des Systems – wie zum Beispiel vertauschte Signaldrähte der LEDs – gefunden und behoben werden.

Steuermatrix			
Simulation		Messung	
-0.919	-0.388	-0.989	-0.362
-0.393	0.903	-0.465	0.890

Tabelle 3: Vergleich zwischen den gemessenen (rechts) und den mit einem Simulationsprogramm bestimmten Matrizen (links) am Beispiel des Sektors 1 für die $+z$ Seite des Detektors (Messung vom 11.8.1989).

4.1.2 Mögliche Verfeinerung des Algorithmus

Bei dem oben beschriebenen Verfahren muß man berücksichtigen, daß die Winkel θ und ϕ des Superspiegels in Schritten von $\frac{1}{1000}$ Grad gefahren werden. Damit kann der vom Superspiegel (M3) auslaufende Strahl in Schritten von $\frac{1}{500}$ (Winkel θ) bzw. $\frac{1}{1000}$ Grad (Winkel ϕ) kontrolliert werden.

Die Abweichung des reflektierten Strahls von einer Sollrichtung kann somit in ϕ ab $\frac{1}{2000}$ und in θ ab $\frac{1}{1000}$ Grad korrigiert werden. Dies ist eine Abweichung gegenüber einer stufenlosen Steuerung von bis zu $140 \mu\text{m}$ in 8m Abstand vom Superspiegel und damit bereits deutlich besser als die Anforderungen von 0.5 mm Einstellgenauigkeit.

Ist die Grenze des oben beschriebenen Verfahrens erreicht, so kann durch Fahren der z - y -Schlitten, die auf $5 \mu\text{m}$ genau gesteuert werden, diese Abweichung nochmals reduziert werden. Dazu wird nur die Positionsinformation der LED-2, also der Referenzebene 2, verwendet. Die Korrektur ist (vgl. Gl. 4.13)

$$\begin{pmatrix} \delta z \\ \delta y \end{pmatrix} = -R_2 \begin{pmatrix} \delta u_2 \\ \delta v_2 \end{pmatrix} \quad (4.24)$$

$$\begin{pmatrix} \delta\theta \\ \delta\phi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (4.25)$$

und somit nur durch die Genauigkeit der Positionsbestimmung bzw. durch die Schrittweite von $5 \mu\text{m}$, mit der die Schlitten gefahren werden, begrenzt.

Diese zweite Korrektur wird derzeit nicht angewendet, da sich die erreichte Genauigkeit von $140 \mu\text{m}$ als hinreichend erwiesen hat.

4.2 Einfädeln des Laserstrahls

Nach dem Aufbau des Laser-Kalibrationssystems am Detektor mußten die Spiegel M1, M2 und das Verteilerrad justiert werden. Anschließend mußten für jeden Sektor der Laserstrahl in die Kammer eingefädelt und die zugehörigen Encoderwerte in eine Datenbank eingetragen werden. Auch wenn an den Komponenten – Verteilerrad oder Superspiegel – Veränderungen vorgenommen werden, muß der Laserstrahl erneut in die Sektoren eingefädelt werden.

Zum Einfädeln des Laserstrahls in die Jetkammer wird der Superspiegel zunächst auf die (im Labor) eingemessenen Encoderwerte gefahren. Im allgemeinen wird dann keiner der Positionsmonitore getroffen, so daß man ohne Information über die Strahlage den Laserstrahl steuern muß. Um den Strahl in einen Sektor einzufädeln werden folgende Fälle unterschieden:

1. Der Laserstrahl trifft keine der LED. Dann muß zunächst die LED-1 ohne weitere Informationen über die Strahlage gesucht werden.
2. Der Laserstrahl trifft die LED-1, aber nicht die LED-2 oder den Szintillationsmonitor.
3. Der Laserstrahl trifft die LED-1 und den Szintillationsmonitor.
4. Der Laserstrahl ist in *mindestens einem* Sektor eingefädelt.

Es wird folgende Vorgehensweise gewählt:

- zu 1:** Ein Programm steuert den Superspiegel so, daß der Laserstrahl solange eine archimedische Spirale beschreibt, bis die LED ein Signal liefert, also „gefunden“ wurde. Der Radius der Spirale wird im Abstand der LED-1 um 5mm pro Umlauf vergrößert. Dadurch ist sichergestellt, daß die LED-1 vom Laserstrahl getroffen wird. Anschließend wird der Superspiegel so gefahren, daß der Laserstrahl die Mitte der LED-1 trifft.
- zu 2:** Der Szintillationsmonitor (SLM) oder die LED-2 werden ebenfalls durch Fahren einer Spirale (analog zu 1) gesucht. Dabei wird der Strahl auf der LED-1 festgehalten. Dies erreicht man dadurch, daß man in Gleichung 4.11–4.17 $\begin{pmatrix} \delta u_1 \\ \delta v_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ setzt und mit einem Polygonzug über $\begin{pmatrix} \delta u_2 \\ \delta v_2 \end{pmatrix}$ die Spirale approximiert.
- zu 3:** Vor der LED-2 befindet sich noch der in vier Quadranten 1–4 unterteilte Szintillationsmonitor (SLM) (vgl. Abb. 12). Dieser SLM vergrößert die Trefferfläche und erleichtert somit das Einfädeln des Laserstrahls: Zeigt einer der Quadranten während des Fahrens der Suchspiralen ein Signal, so kann der Strahl gezielt zur Mitte der LED-2 gebracht werden. Dazu wird jedem Quadranten die Richtung $\begin{pmatrix} \delta u_2 \\ \delta v_2 \end{pmatrix}$ zugeordnet (Tab. 4), in die der Laserstrahl bewegt werden muß, um auf die LED-2 zu gelangen.

zu 4: Ist der Laserstrahl in einen Sektor (Nr. i) erfolgreich eingefädelt worden, so werden aus dem Vergleich der neuen Encoderwerte $(z, y, \theta, \phi)_{neu(i)}$ des Superspiegels mit den entsprechenden früheren Werten $(z, y, \theta, \phi)_{alt(i)}$, neue Startwerte für benachbarte Sektoren (Nr. k) berechnet:

$$(z, y, \theta, \phi)_{start(k)} = (z, y, \theta, \phi)_{neu(i)} - (z, y, \theta, \phi)_{alt(i)} + (z, y, \theta, \phi)_{alt(k)}$$

Fast immer wird dann die LED-1 getroffen, sonst muß wie in 1 die LED-1 gesucht werden.

Die dargestellten Verfahren und die im Kapitel 4.1 beschriebenen Algorithmen wurden auf dem Mikroprozessorsystem in der Programmiersprache „C“⁷ implementiert. Die Programme können durch einfache Kommandos aktiviert werden.

Die notwendige Zeit, um die Sektoren einzufädeln, ist im allgemeinen durch die Fahrzeiten der linearen Schlitten und die Positionsmessungen bestimmt. Im Herbst 1989 wurden zum Neueinfädeln des Laserstrahls in alle Sektoren des Detektors etwa 7.5 Stunden für jede Seite benötigt. Für die Korrekturen der Strahlage werden etwa 10 min aufgewendet.

Quadrant	Richtung
1	$\begin{pmatrix} -1 \\ -1 \end{pmatrix}$
2	$\begin{pmatrix} +1 \\ -1 \end{pmatrix}$
3	$\begin{pmatrix} +1 \\ +1 \end{pmatrix}$
4	$\begin{pmatrix} -1 \\ +1 \end{pmatrix}$

Tabelle 4: Richtungszuordnungen: Jedem Quadranten der SLM wird die Richtung zugeordnet, in die der Laserstrahl bei einem Treffer bewegt werden muß, um die LED-2 zu treffen.

4.3 Struktur der Programme zur Steuerung des Laser-Kalibrationssystems

Das auf dem Steuerrechner eingesetzte Betriebssystem OS9 hat einige wichtige Eigenschaften [OS9-In, OS9-Sy, OS9-Ln]:

- OS9 ist ein „Multitasking“-Betriebsystem, d.h. mehrere Programme, im folgenden Prozesse genannt, können quasi gleichzeitig abgearbeitet werden.
- OS9 unterstützt die Verwendung von Modulen. Dabei wird zwischen Programm-Modulen und Daten-Modulen unterschieden:
 - Programm-Module sind aktive oder nicht aktive Prozesse.
 - Daten-Module sind reservierte Speicherbereiche, über die der Austausch von Daten zwischen verschiedenen Prozessen möglich ist.
- OS9 unterstützt Signale (signals) und Ereignisse (events) mit denen Prozesse synchronisiert und aktiviert werden können.

Diese Eigenschaften erlauben eine Modularisierung und erleichtern die Entwicklung der Steuerprogramme.

⁷Die Firma „Microware Systems Corporation“ liefert das Betriebssystem OS-9 zusammen mit einer Entwicklungsumgebung. Diese umfaßt einen Editor (μ Macs), einen C-Compiler (CC) und einen Sourcecode-Debugger.

In Abb. 23 sind die wichtigsten Prozesse und Module zur Steuerung des Kalibrationssystems dargestellt: Der Prozess *read_all* wird durch das Triggersignal der Photodiode aktiviert und liest die Encoderstellungen des Superspiegels, des Teleskops, der $\lambda/2$ -Platte, sowie die Ladungen Q_1 bis Q_4 der LEDs und die Szintillationsmonitore aus. Unter Berücksichtigung der in Kapitel 2.6.3. beschriebenen Ladungsschnitte werden aus den Ladungen die Trefferkoordinaten berechnet und anschließend alle Daten in ein Datenmodul *benno*⁸ eingetragen.

Ein Ereignis – „*bumm*“ genannt – teilt darauf wartenden Prozessen mit, daß neue Daten zur Weiterbearbeitung vorliegen. Dieses *Bumm*-Event startet je nach Situation einige weitere mögliche Prozesse:

- zur graphischen Darstellung der LED-Trefferinformationen.
- zur Überwachung des Systemzustandes.
- zum Fahren des Superspiegels.
- zum Einstellen des Teleskops und der $\lambda/2$ -Platte.
- zum Einfädeln des Laserstrahls.
- zur Korrektur der Strahllage des Laserstrahls.
- zur Messung der Steuermatrizen R_1 und R_2 .
- zur Verwaltung einer Datenbank, die alle wichtigen Steuerdaten enthält.
- zum Schalten der Pockelszelle.

Jeder dieser Prozesse kann dabei auch andere Prozesse starten; zum Beispiel wird zum Fahren der Motoren die neue Sollposition in ein Daten-Modul eingetragen und anschließend über das Ereignis *setmotor* ein Prozess gestartet, der dann erst die Motorkarten steuert.

4.3.1 Vorteile modularer Programmierung

Die Modularisierung hat einige wichtige Vorteile:

- Die einzelnen Programme sind relativ klein und somit überschaubar. Fehler lassen sich somit schneller finden und beheben. Unbeabsichtigte Seiteneffekte werden vermieden.
- Neue Prozesse lassen sich sehr einfach einbinden.
- Durch die Trennung derjenigen Prozesse, die direkt auf die Elektronik zugreifen, von denen, die die Daten verwerten, sind alle „hardware“-nahen Routinen in wenigen Prozessen konzentriert. Änderungen in diesen Routine werden somit sofort von allen weiterverarbeitenden Prozessen benutzt.

Die Entwicklung und Optimierung der Steuerprogramme wurde besonders der letzte Punkt erleichtert:

Da das Kalibrationssystem erst kurz vor Inbetriebnahme des LEP-Speicherringes fertiggestellt werden konnte, war zuvor kein Test der Steuerprogramme möglich gewesen.

⁸Die Struktur dieses Datenmoduls wurde von Bernhard Wunsch – *Benno* genannt – im September 1988 für einen Test (24-Sektor-Test) der OPAL-Jetkammer vorgeschlagen.

Es wurden, wie in Abb. 24 dargestellt, die „hardware“-nahen Prozesse durch ein möglichst realistisches Simulationsprogramm ersetzt, so daß sich die höheren Prozesse testen und verbessern liessen und die Abhängigkeit der Steuerprogramme von Parametern erfaßt werden konnte. Dieser Simulationsprozeß muß den Strahlengang, die Positionsmonitore und den Superspiegel simulieren und alle notwendigen Daten und Signale bereitstellen. Auch muß auf Befehle entsprechend reagiert werden. Die höheren Prozesse arbeiten dann *ohne Änderungen* sowohl mit der Simulation als auch in Verbindung mit der vorhandenen Hardware.

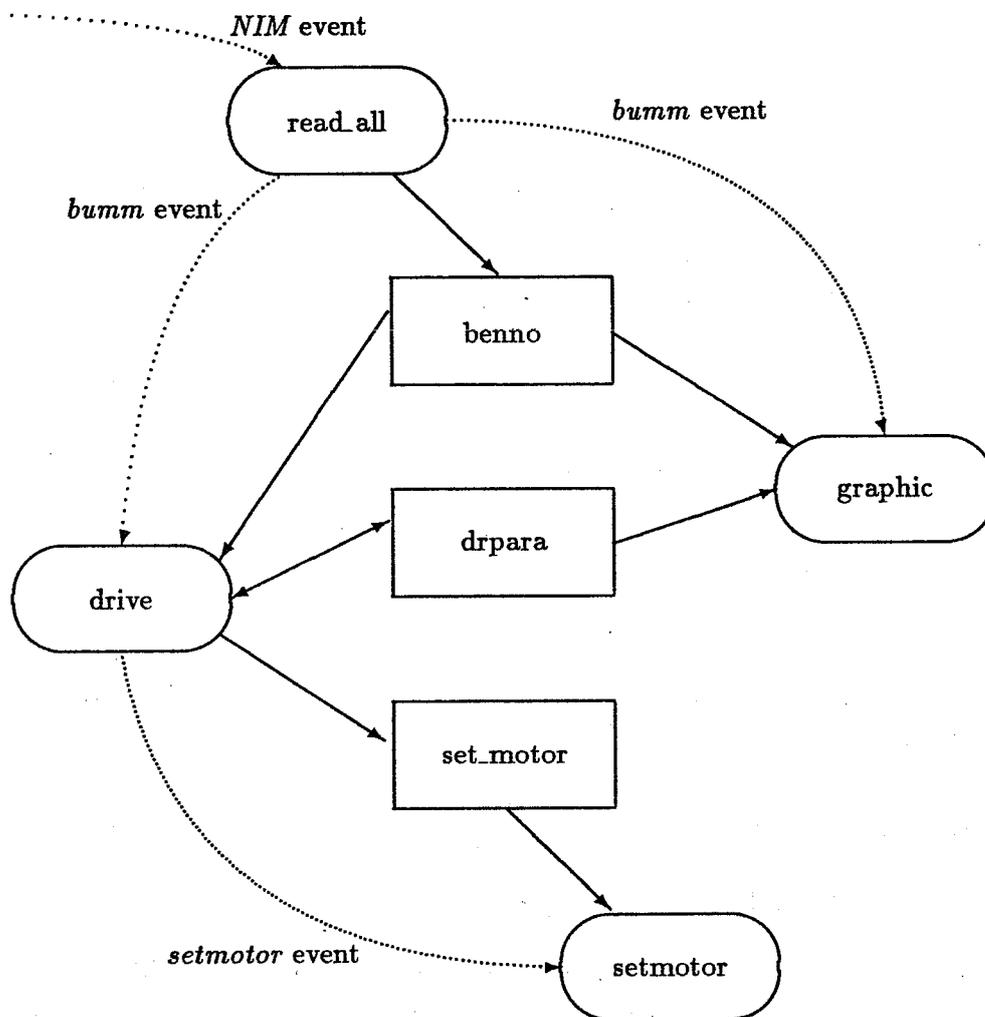


Abb. 23: Die Prozesse (Ovale) zur Steuerung werden durch den Austausch von „signals“ und „events“ synchronisiert. Daten werden über Daten-Module (Rechtecke) ausgetauscht. Die Prozesse *read_all* und *setmotor* haben direkten Zugriff auf die Elektronik. Das Signal *NIM-Event* wird vom gleichen Triggersignal erzeugt, das auch die Ausleseelektronik startet. Der Prozess *drive* und andere in gleicher Weise eingebundene Prozesse steuern das Kalibrationssystem. Das Modul *drpara* hält die Steuermatrizen, Encoderwerte und weitere Parameter zur Kontrolle des Kalibrationssystems.

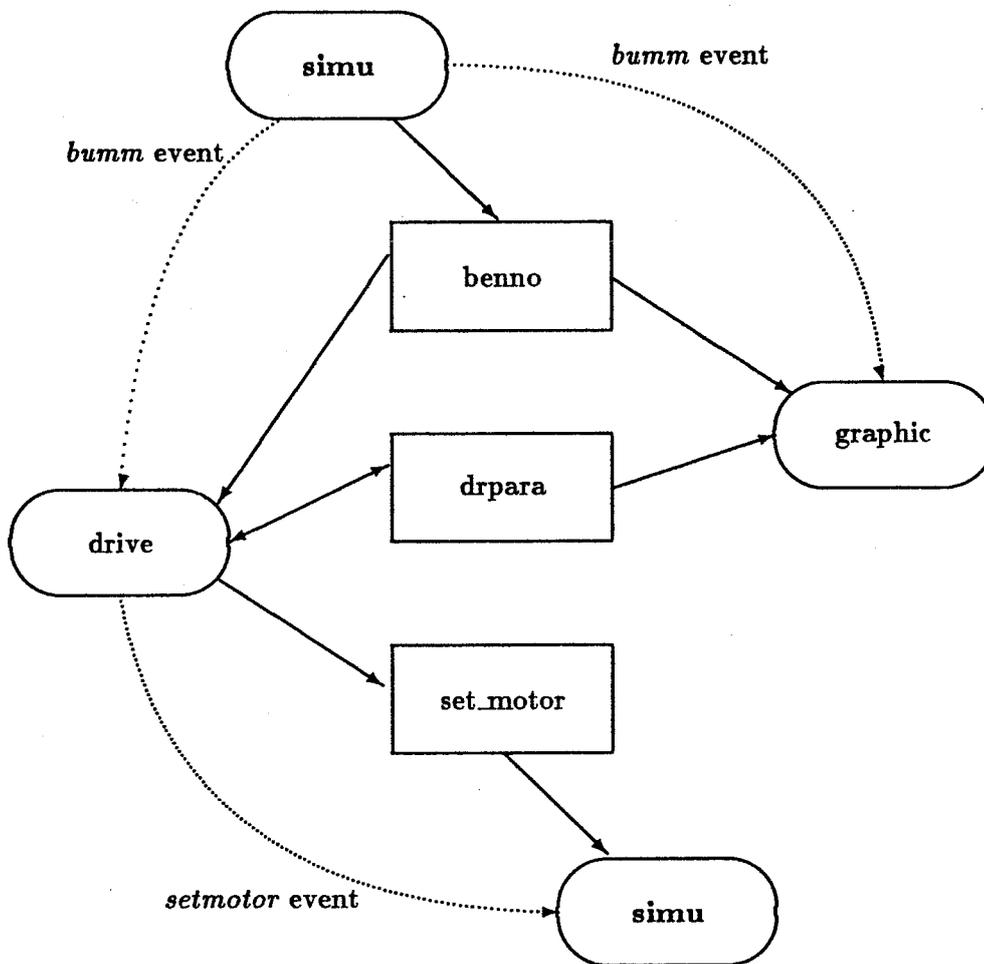


Abb. 24: Die „hardware“-nahen Prozesse werden durch den Simulationsprozess *simu* ersetzt. Alle übrigen Prozesse sind von dieser Änderung nicht betroffen.

5 Test des Algorithmus

Die Programme zur Steuerung des Kalibrationssystems müssen stabil und zuverlässig laufen. Wichtige Anforderungen sind:

- Die Genauigkeit, mit der der Laserstrahl auf den Positionsmonitoren die vorgegebenen LED-Positionen trifft. Da der Strahlteiler mit einer Genauigkeit von ± 0.5 mm getroffen werden muß, werden für die LEDs eine Genauigkeit von ± 0.4 mm gefordert.
- Die Reproduzierbarkeit dieser Strahlage.
- Die Stabilität gegenüber Veränderungen des Verzerrungsparameters k . Dieser wurde nicht für jede LED bestimmt, vielmehr wird ein fester Wert von $k = 0.184$ für alle LED verwendet.
- Die Toleranz gegenüber Fehlern bei den verwendeten Matrizen. Es werden die mit der Simulation bestimmten Werte benutzt. Diese wurden zwar mit den gemessenen verglichen – die Abweichungen sind minimal (vgl. Kap. 4.1.1.) – doch muß sichergestellt sein, daß der Algorithmus unempfindlich gegenüber Fehlern bei der Berechnung der Matrizen ist.

Es wurden einige Tests mit einem Testaufbau (Abb. 25) durchgeführt:

Der Laserstrahl wird vom Superspiegel auf eine in ca. 2 m Abstand aufgebaute Quarzplatte gelenkt. Diese und eine zweite Quarzplatte sind im Abstand von 4.5 m unter einem Winkel von 45° auf einer optischen Bank justiert. Diese Platten reflektieren ca 5% der Intensität des auftreffenden Laserstrahls. Der von der ersten Quarzplatte reflektierte Teil wird auf die LED-1 gelenkt, der transmittierte Strahl (95%) trifft auf die zweite Quarzplatte. Dort wird ein Teil der Strahlenergie auf die LED-2 reflektiert.

Die Positionsmonitore wurden mit der später am Detektor verwendeten Elektronik ausgelesen.

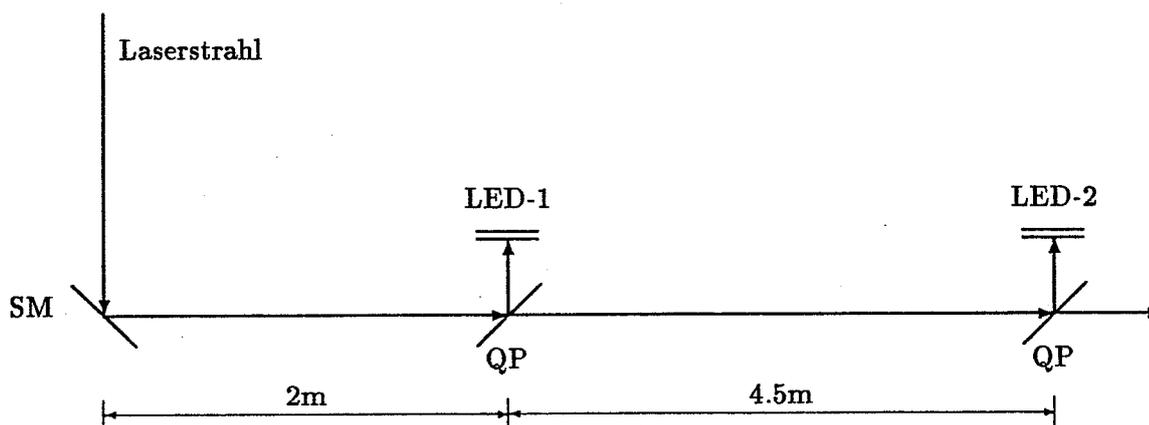


Abb. 25: Testaufbau: Auf zwei LEDs, die mit einem Abstand von ca. 4.5 m aufgebaut sind, werden mit dem Superspiegel (SM) zwei vorgegebene Strahlagen abwechselnd angefahren (siehe Text).

5.1 Genauigkeit und Reproduzierbarkeit

Mit dem Testaufbau wurden die Genauigkeit und die Reproduzierbarkeit untersucht. Dazu wurden von dem Programm zur Korrektur der Strahlage auf der ersten LED die Koordinaten (in mm) $\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3,0 \\ 3,0 \end{pmatrix}$ und $\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -3,0 \\ -3,0 \end{pmatrix}$ und auf der zweiten LED diagonal dazu die Koordinaten $\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -3,0 \\ 3,0 \end{pmatrix}$ und $\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3,0 \\ 3,0 \end{pmatrix}$ mehrfach und im Wechsel angefahren.

Die LED-Positionen und die Projektionen auf die x - und y -Achsen sind in der Abb. 26 dargestellt. Die maximale Abweichung der erreichten Position von der Sollposition („totale“ Breite der Verteilung) beträgt $\pm 200 \mu\text{m}$.

Die erreichten (nicht linearisierten) LED-Koordinaten wurden als Mittelwert über 40 Laserschüsse gemessen. Der statistische Fehler des Mittelwertes beträgt somit $13 \mu\text{m}$ (vgl. Kap. 3.6.3). Ein systematischer Fehler ist nicht von Bedeutung, da die LEDs nicht zur Bestimmung einer absoluten Position eingesetzt werden, sondern die Reproduzierbarkeit einer LED-Position verlangt wird.

Im OPAL Detektor beträgt der Abstand zwischen den beiden Positionsmonitoren 4.6 m, etwa 0.9 m weiter befindet sich der Strahlteiler. Ein Fehler in der Strahlage von $\pm 200 \mu\text{m}$ bedeutet somit am Ort des Strahlteilers einen Fehler von ca. $\pm 250 \mu\text{m}$. Dies ist um den Faktor 2 genauer als der vorgegebene Wert von $\pm 500 \mu\text{m}$. Im Mittel wurden 5 Iterationen benötigt, um den Iststrahl in eine neue Sollstrahlage zu überführen. Die Anforderungen an den Algorithmus zur Korrektur der Strahlage werden somit voll erfüllt.

5.2 Stabilität

Es wurde die Stabilität des Algorithmus zur Korrektur der Strahlage gegenüber Veränderungen des Verzerrungsparameters k und der Matrizen mit der Simulation getestet. Dazu wurden untersucht:

- Die Stabilität in Abhängigkeit vom Verzerrungsparameter k der Simulation.
- Die Stabilität in Abhängigkeit von einer „Verdrehung“ der Steuermatrizen R_1 und R_2 . Dazu wurde die Steuermatrizen mit einer Rotationsmatrix D multipliziert:

$D R$

mit

$$D = \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix}.$$

Dabei ist φ der Drehwinkel.

Als Kriterium der Stabilität dient die Anzahl der Iteration, die zur Korrektur der Strahlage benötigt werden. Auch hierfür wurden auf den Positionsmonitoren zueinander diagonal liegende Koordinaten angefahren.

Das Ergebnis der Rechnung ist den Abb. 27 und 28 zu entnehmen. Das Verfahren erweist sich im hohen Maße robust gegenüber Veränderungen des Verzerrungsparameters k um mehr als 30%. Entsprechendes gilt für die Matrizen. Der Winkel φ kann ohne Einfluß auf die Anzahl der nötigen Iteration 15 Grad betragen; damit bleibt eine „Verdrehung“ der Rotationsmatrizen R_1 und R_2 um 15 Grad ohne Einfluß auf die Anzahl der nötigen Iterationen. Selbst bei einem Winkel $\varphi = 40^\circ$ konvergiert das Verfahren. Erst bei einer Verdrehung einer der Matrizen um 55 Grad konvergiert die Iteration nicht mehr, sondern die (simulierte) Strahlage oszilliert um den Sollwert.

WECHSEL $(-3.0, -3.0) - (3.0, 3.0)$

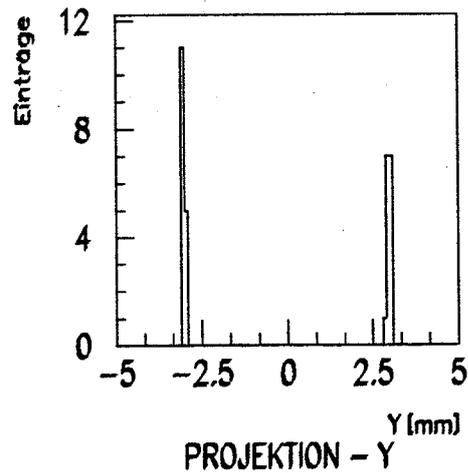
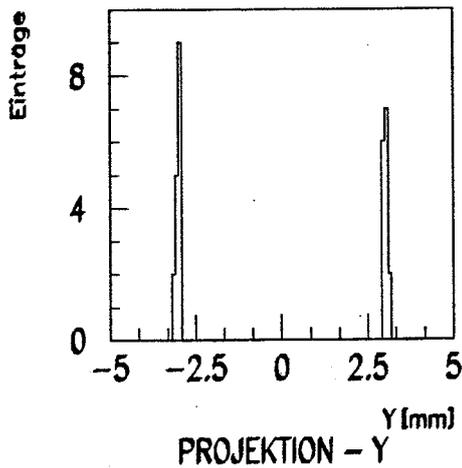
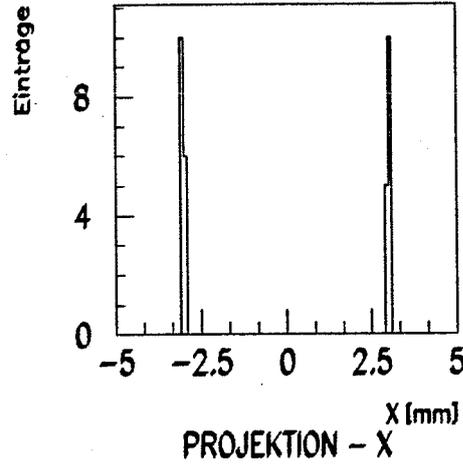
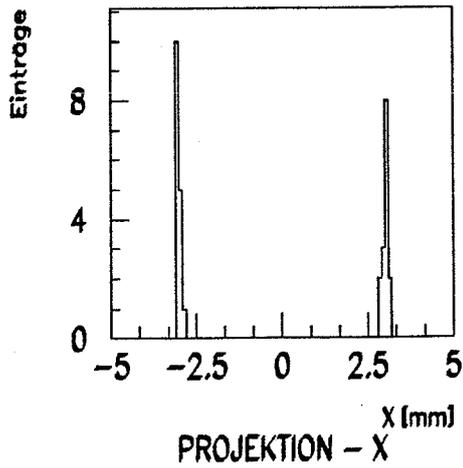
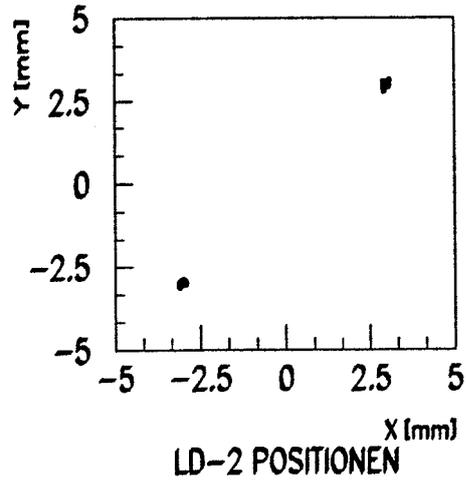
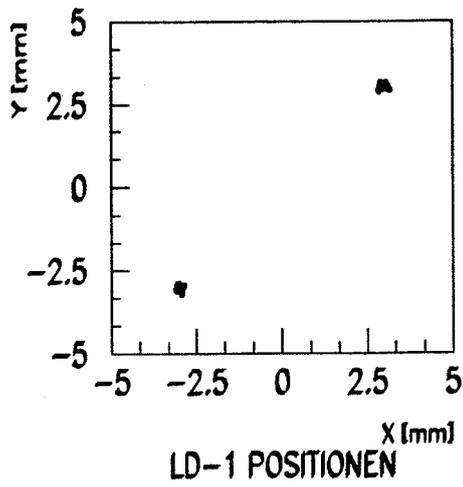


Abb. 26: Test der Reproduzierbarkeit: Auf zwei LEDs im Abstand von ca 4.5 m werden zwei vorgegebene Positionen im Wechsel angefahren (siehe Text). Dargestellt sind die erreichten Endpositionen; links für LED-1, rechts für LED-2. In den Histogrammen ist jeweils die Projektion der Ortsverteilungen auf die x- bzw. y-Achse dargestellt. Die totale Breite der Verteilungen ist kleiner als $\pm 200 \mu\text{m}$.

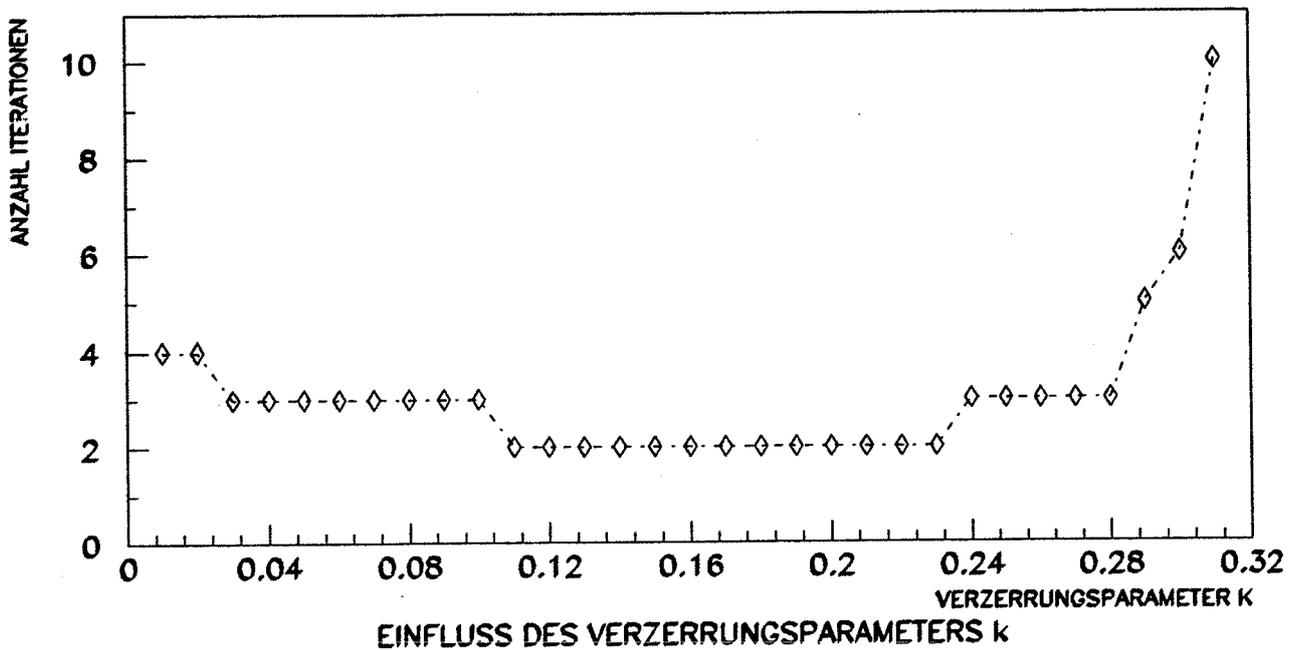


Abb. 27: Der Verzerrungsparameter k wurde nicht individuell für jede LED bestimmt. Dargestellt ist die Anzahl der notwendigen Iterationen gegen den in der Simulation verwendeten Verzerrungsparameter k . Zur Linearisierung der simulierten LED Koordinaten verwendet der Iterationsprozeß den in [Koch90] angegebenen gemessenen Wert von $k=0.184$.

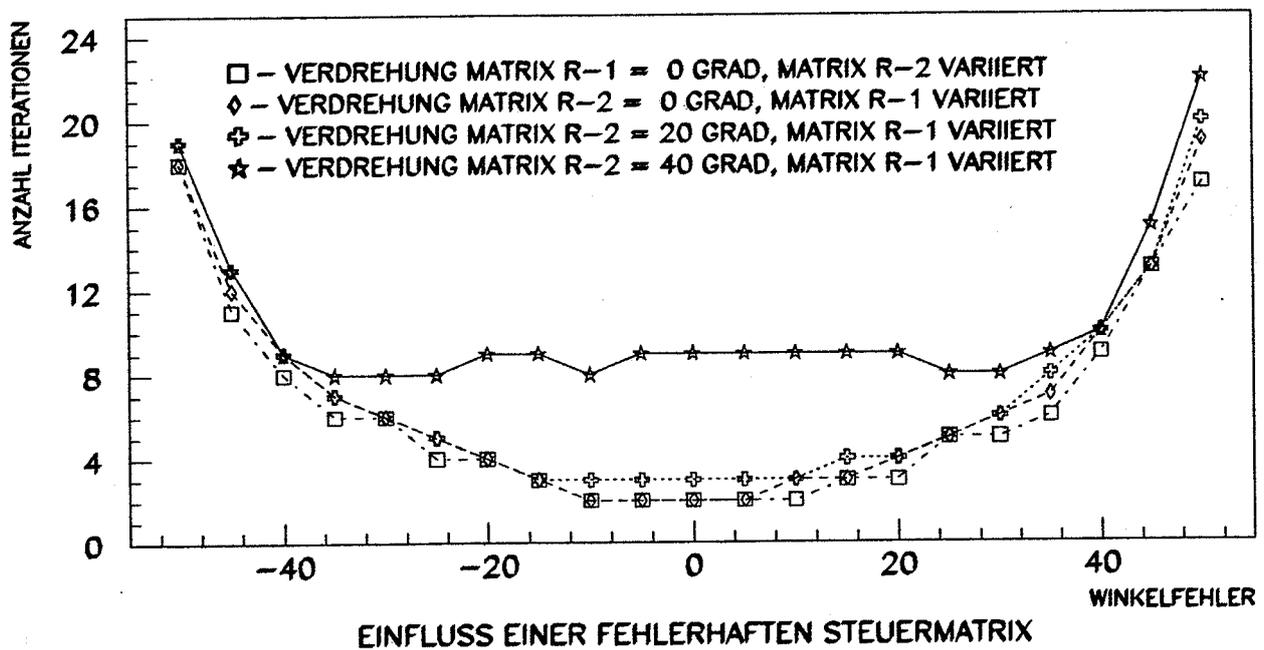


Abb. 28: Die Steuermatrizen R_1 bzw. R_2 wurden gegenüber dem Sollwert in Schritten von 5 Grad gedreht. Ortsschwankungen des Laserstrahls und die Nichtlinearität der LED wurden hier nicht simuliert.

Man erkennt, daß die Anzahl der Iterationen über weite Bereiche unabhängig von einer Verdrehung der Steuermatrizen ist. Selbst wenn beide Matrizen um 40 Grad gedreht werden, konvergiert die Iteration.

5.3 Weitere Einflüsse

Es gibt eine Reihe weiterer möglicher Einflüsse auf die Strahlage. Während eines Langzeittests – dabei wurde, ohne die Encoderstellung des Superspiegels zu verändern, auf die LEDs geschossen – beobachtete man die in Abb. 29 dargestellten Schwankungen des gemessenen Ortes x bzw. y mit der Zeit. Die Schwankungen haben eine Amplitude von $200\ \mu\text{m}$ und sind somit nicht zu vernachlässigen. Ihre Periodendauer betrug ca. 10 min. Der Wechsel der Position erfolgte dagegen in vergleichsweise kurzen Zeiträumen, daher haben die Schwankungen eine etwa rechteckförmige Struktur.

Das Zeitintervall von 10 min stimmt ungefähr mit der Meßzeit zur Kalibration eines Sektors der OPAL-Jetkammer überein. Damit würde während der Kalibration die Position des Laserstrahls in der Kammer schwanken. Dies ist in dieser Größenordnung nicht zu tolerieren.

Abb. 29 zeigt, daß sich diese zeitliche Schwankung nicht in der vom Laser freigesetzten Ladung wiederfinden läßt.

Die Ursache für diese zeitliche Schwankung wurde im Kühlsystem des verwendeten Lasers gefunden. Dieses besteht aus einem Kühlreservoir mit einem Wärmetauscher für den inneren Kühlkreislauf. Übersteigt die Temperatur des Wassers im Reservoir eine vorgegebene Schwelle, so wird das erwärmte Kühlwasser binnen weniger 10 sec durch kaltes Wasser ersetzt. Es zeigte sich, daß dieser Austausch ca. alle 10 min erfolgte. Bei den derzeit verwendeten Laser wird daher kontinuierlich gekühlt.

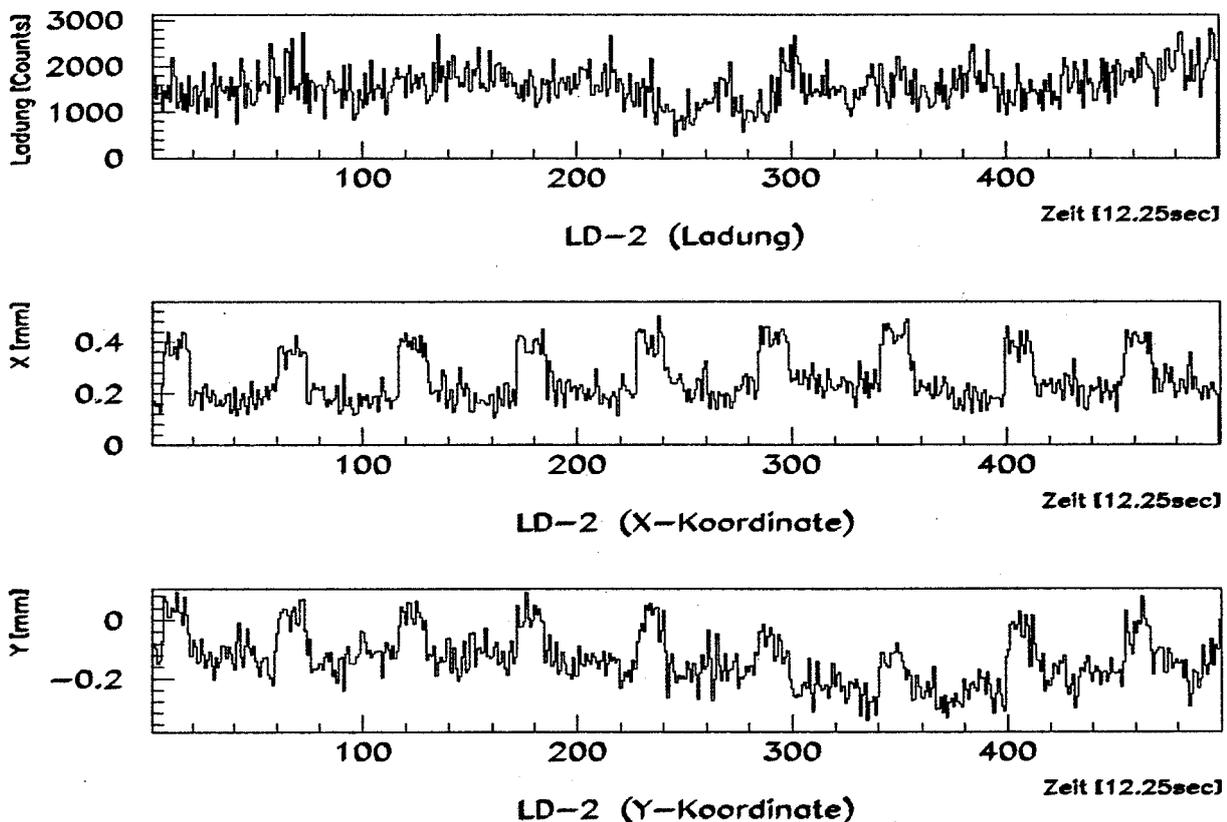


Abb. 29: Schwankungen des Laserstrahls: Über 2 Stunden wurde mit dem Laser bei einer Schußrate von 5 Hz auf die LEDs geschossen (Testaufbau Abb. 25). Es sind die zeitliche Entwicklung der gemessenen Ladung und die zeitlichen Schwankungen der gemessenen Positionen x und y dargestellt. Jeder Meßpunkt entspricht dabei einem Mittelwert aus 20 Einzelmessungen. Die starken Schwankungen in den gemessenen Positionen zeigen eine rechteckförmige Struktur.

5.4 Untersuchungen zu möglichen Reflexionen

Wie in Kapitel 3 beschrieben verlaufen große Teile des Strahlengangs in Rohren. Diese Rohre bestehen aus gezogenem Aluminium. Es wurde beobachtet, daß bei einer größeren Abweichung der Strahlage vom Sollstrahl (ca. 3 mrad) der Laserstrahl die Innenwand der Rohre trifft und dort (fast) vollständig reflektiert wird.

Es muß jedoch sichergestellt sein, daß der Laserstrahl ohne eine solche Reflexion in die Jetkammer geschossen wird, da sonst sowohl die Strahlage von den Vorgaben abweicht, als auch das Strahlprofil stark verändert wird; damit wäre eine Kalibration der OPAL-Jetkammer mit Laserstrahlen nicht möglich.

Zur Untersuchung der Reflexion in einem solchen Rohr diente das Simulationsprogramm. Dabei wurde eine ideal glatte und 100% reflektierende Oberfläche angenommen. Ein Strahlenbündel mit einer gaußförmigen Dichteverteilung der einzelnen Strahlen repräsentierte den Laserstrahl. Jeder einzelne Strahl des Bündels wird dann durch das Rohr von 1.2 cm Radius und 4.6 m Länge geleitet. In der Abb. 30 sind ein einlaufendes und das am Ende des Rohres auslaufende Strahlenbündel dargestellt. Um den Effekt zu verstärken, wurde der Durchmesser des Bündels gegenüber dem tatsächlichen Durchmesser (von 1.2 mm) des Laserstrahles vergrößert. Man erkennt, daß das Bündel nach der Reflexion am Ende des Rohres fokussiert wird.

Das entstehende Bild der Dichteverteilung des auslaufenden Strahles stellt eine Kaustik dar, wie sie z.B. in einer gewölbten Tasse beobachtet werden kann. Solche Kaustiken ließen sich bei einem Test, bei dem ein Helium-Neon Laserstrahl in einem Rohr reflektiert wurde, wiederfinden.

Wird, wie bei der Messung der Steuermatrizen, mit dem Laserstrahl ein Kreuz beschrieben, so kann dies trotz Reflexion im Rohr von einer LED gemessen werden. In der Abb. 31 ist die Simulation eines solchen Kreuzes gezeichnet. Die mit einer Reflexion bestimmten Matrizen weichen jedoch stark von denen ohne Reflexion ab. In der Tabelle 5 sind eine mit Reflexion gemessene Matrix und die entsprechende mit der Simulation (ohne Reflexion) bestimmte Matrix eingetragen. Die Determinante der Matrix zeigt eine drastische Abweichung von dem erwarteten Wert ± 1 . Damit ist ein einfaches Unterscheidungskriterium gegeben.

Da aber die Zeit zur Vorbereitung einer Kalibrationsmessung begrenzt ist, kann diese Methode zur Erkennung einer Reflexion nicht ausgenutzt werden. Vielmehr muß die Möglichkeit einer Reflexion in den Rohren vermieden werden. Dies ist durch eine stark absorbierende und diffus reflektierende Auskleidung der Rohre erreicht worden.

Matrizen			
Simulation		Messung	
0.079	-0.997	-0.087	-1.063
-0.997	-0.079	-0.286	0.020
Det =	-1.000	Det =	-0.321

Tabelle 5: Reflexion im Rohr: Veränderung der Steuermatrix. Links ist die korrekte Matrix, rechts die nach einer Reflexion im Rohr gemessenen Matrix angegeben.

VERZERRUNGEN DURCH REFLEKTION IM ROHR

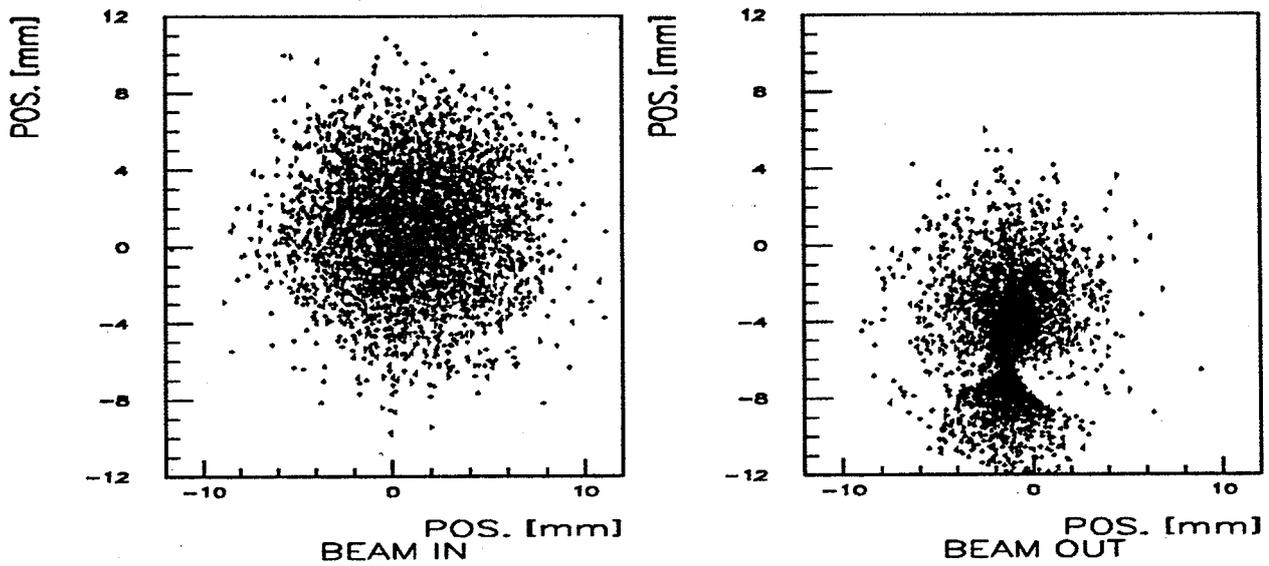


Abb. 30: Simulation der Reflexion eines Strahls im Rohr: Links ist der einlaufende Strahl, rechts der am Ende des 4.6 m langen Rohres auslaufende Strahl dargestellt. Die Reflexion erzeugt eine Kaustik, der Strahl wird fokussiert.

VERZERRUNGEN DURCH REFLEKTION IM ROHR

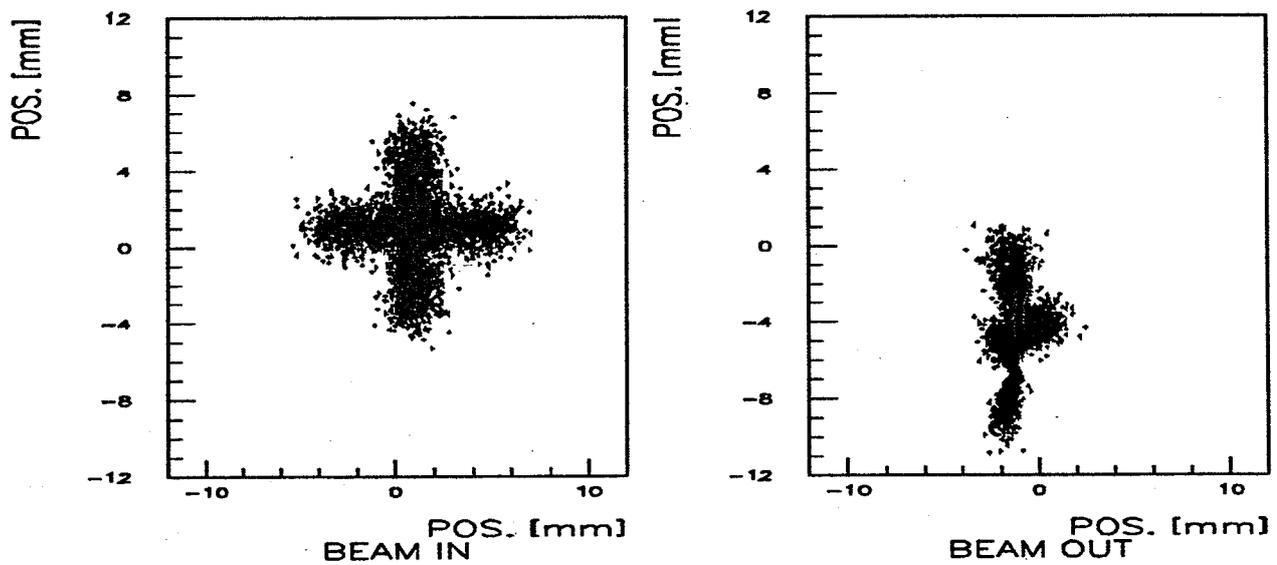


Abb. 31: Kreuz bei Reflexion: Ein mit dem Laserstrahl beschriebenes Kreuz wird stark deformiert.

6 Messung der Position des Verteilerrades

Um den OPAL-Detektor öffnen zu können, muß zuvor das Verteilerrad demontiert werden. Das Verteilerrad wird relativ zum LEP-Strahlrohr aufgebaut, die Position ist mit einer Genauigkeit von ≤ 2 mm reproduzierbar. Die Position des Laserkonus – im Drucktank eingebaut – ist auf etwa 1 mm genau bekannt. Die Unsicherheit in der Position des Verteilerrades relativ zum Laserkonus beträgt somit etwa 2 bis 3 mm. Damit der Laserstrahl überhaupt in die Jetkammer gelenkt werden kann, muß das Verteilerrad mit möglichst hoher Präzision justiert werden.

Im folgenden wird untersucht, welche Anforderungen an die Justierung des Verteilerrades gestellt werden müssen und welche Abweichungen von den Vorgaben mit dem Superspiegel ausgeglichen werden können. Außerdem wurde aus den Encoderwerten des Superspiegels, mit denen der Laserstrahl in die Sektoren der Jetkammer gelenkt wurde, nachträglich die Position des Verteilerrades zu berechnen.

6.1 Anforderung an die Justierung des Verteilerrades

Zur Untersuchung der Anforderungen an die Justierung des Verteilerrades wurde ein „Offline“-Simulationsprogramm erstellt. Ähnlich wie bei der „Online“-Simulation werden alle Komponenten des Laser-Kalibrationssystems, insbesondere der Superspiegel, das Verteilerrad und der Laserkonus dargestellt, auch die Positionsmonitore werden simuliert. In der Simulation können alle Komponenten durch geeignete Parametrisierungen verschoben und gedreht werden.

Die Auswirkung einer Dejustierung des Verteilerrades wird als Abweichung der Encoderwerte des Superspiegels gegenüber den Werten bei idealer Einstellung in den Abbildungen 32 und 33 dargestellt. Die Positionierung und Ausrichtung des Superspiegels und des Laserkonus wurden auf die nominellen Werte gesetzt.

Abgebildet sind die folgenden Dejustierungen des Verteilerrades:

- In Abb. 32 wurde das Verteilerrad in der x - y -Ebene, in positiver x -Richtung in Schritten von 4 mm verschoben. Die Abweichungen der Encoderwerte z und y von maximal 1500 bzw. 2500 Counts sind im Vergleich zum verfügbaren Fahrbereich⁹ des Superspiegels akzeptabel. Die Positionierung des Verteilerrades ist somit unempfindlich gegen kleine Verschiebungen von einigen mm in x -Richtung. Gleiches gilt auch für eine Verschiebung in y -Richtung. Dieses Resultat findet man auch bei einer gleichzeitigen Verschiebung des Verteilerrades in x und y .
- In Abb. 33 wurde das Verteilerrad um seine y -Achse in Schritten von 1.5 mrad gedreht. Die Abweichungen der Encoderwerte z und y liegen mit ca 2000 Counts bei 3 mrad Dejustierung im tolerierbaren Bereich. Ein ähnliches Resultat findet man auch bei einer Verkipfung des Verteilerrades um die x -Achse: 1 mrad entspricht einer Verkipfung des Verteilerrades um 1.5 mm bezogen seine Länge.

Bei der Beurteilung dieser Ergebnisse sind zwei weitere Einflüsse zu beachten. Zum einem ist die relative Anordnung des Superspiegels zum Verteilerrad und zum Laserkonus nur für eine Komponente gestört worden. Außerdem sind die Einstellungen der Rohrspiegel des Verteilerrades nicht – wie in der Simulation vorausgesetzt – ideal, sondern die Encoderstellungen des Superspiegels zeigen auch wegen individueller Fehleinstellungen dieser Rohrspiegel Abweichungen.

⁹Vgl. Kap. 3.3

VERSCHIEBUNG VERTEILERRAD (STEP $dx=4.00\text{mm}$ $dy=0.00\text{mm}$)

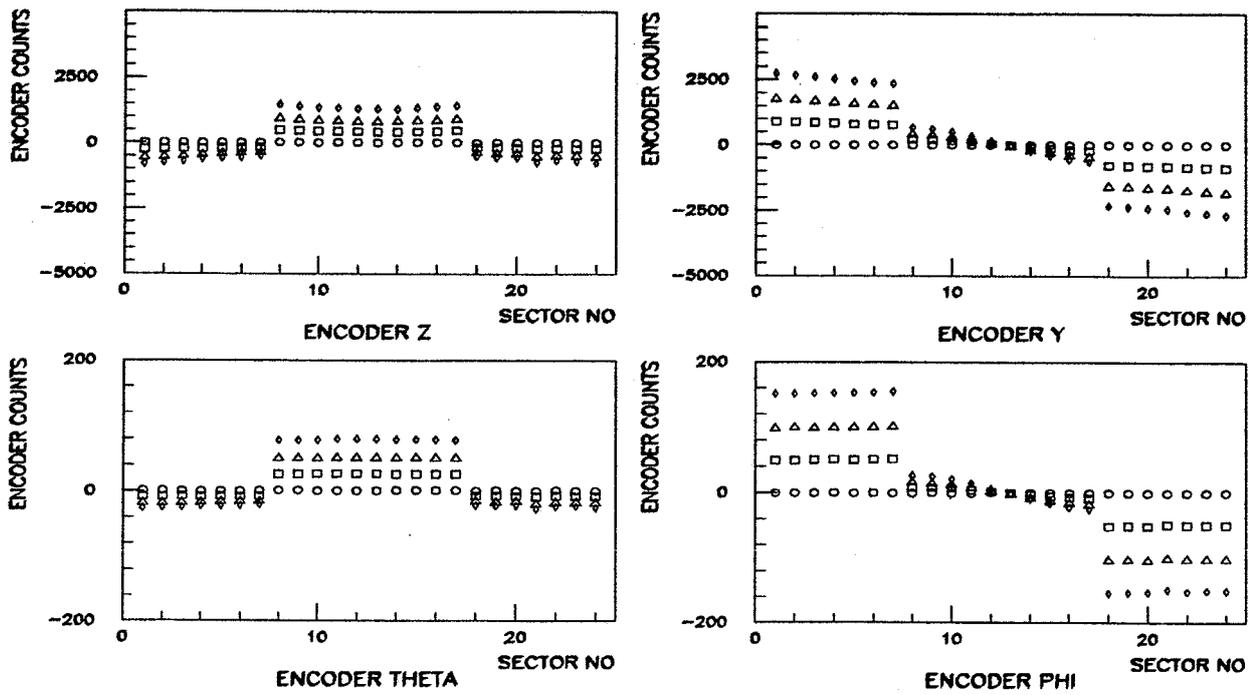


Abb. 32: Einfluß einer Dejustierung des Verteilerrades: Dargestellt sind die Änderungen der Encoderwerte des Superspiegels bei einer Verschiebung des Verteilerrades in x-Richtung.

VERSCHIEBUNG VERTEILERRAD (STEP $dx=4.00\text{mm}$ $dy=0.00\text{mm}$)

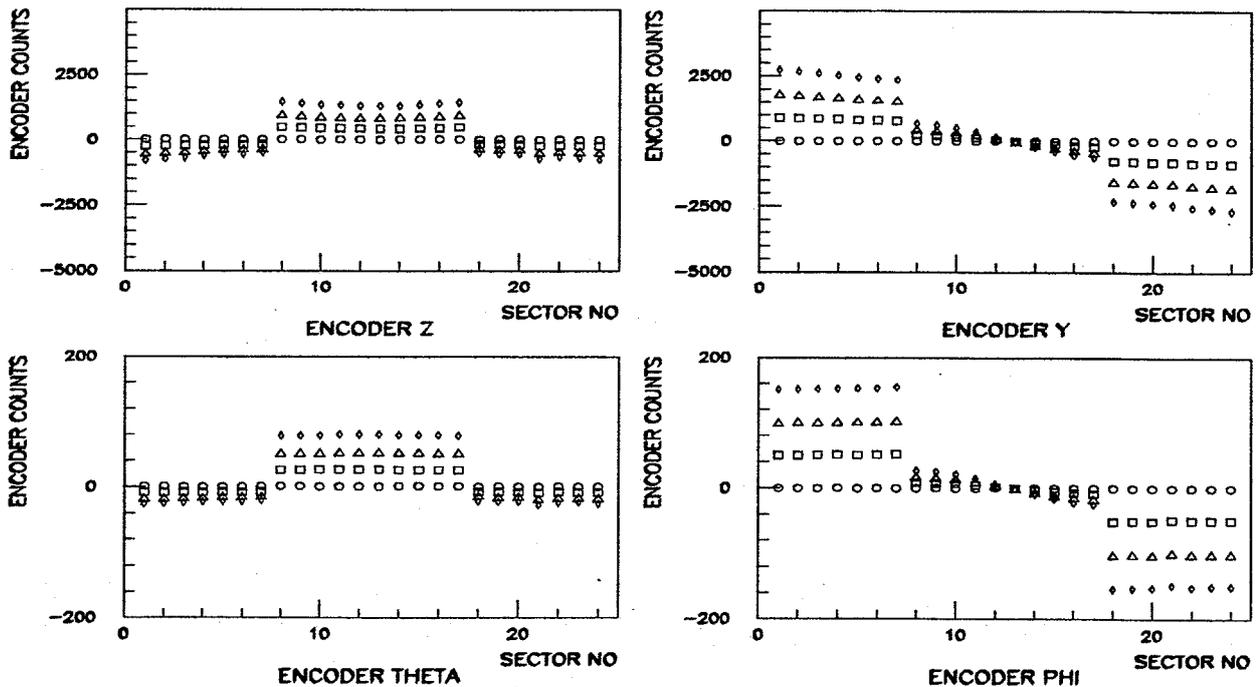


Abb. 33: Einfluß einer Dejustierung des Verteilerrades: Dargestellt sind die Änderungen der Encoderwerte des Superspiegels bei einer Drehung des Verteilerrades um die y-Achse.

Der Fahrbereich in den linearen Freiheitsgraden z und y des Superspiegels ist mit ca. 5500 bzw 9900 Counts ausreichend groß, um solche kleineren Verstellungen kompensieren zu können.

Auch eine Veränderung der Position des Superspiegels wurde simuliert. Dabei zeigte sich, daß eine auf 10 mm genaue Justierung ausreicht, damit der Laserstrahl noch sicher in die Jetkammer gelenkt werden kann.

6.2 Berechnung der Position des Verteilerrades

Mit Hilfe der „Offline“-Simulation kann die Position und eine eventuelle Dejustierung des Verteilerrades und des Superspiegels aus den Encoderwerten des Superspiegels bestimmt werden. Dazu wurde eine Funktion $F(z_i, y_i, \theta_i, \phi_i)$ (i über alle 24 Sektoren), die von der Position und Orientierung des Verteilerrades $(x, y, \theta, \phi)_{VR}$ sowie der Nullstellung der Encoder und der Position des Superspiegels $(Z_{enc}, Y_{enc}, \theta_{enc}, \phi_{enc}, x, y, z)$ als Parametern abhängt, mit dem Programm „MINUIT“ [Minuit] angepaßt. Die z -Position des Verteilerrades wird nicht angepaßt, da dieser Parameter mit der z -Position des Superspiegels direkt korreliert ist. Wichtig ist aber die relative z -Position der beiden Komponenten zueinander. Daher wird nur die z -Position des Superspiegels als freier Parameter den Encoderdaten angepaßt. Die Funktion F ist als gewichtete Summe der Abweichungsquadrate zwischen gemessenen und mit der Simulation bestimmten Encoderwerten definiert:

$$\begin{aligned}
 F = & \frac{1}{g_z^2} \sum_{i=1}^{24} (z_{i,simu} - z_{i,mes})^2 + \\
 & \frac{1}{g_y^2} \sum_{i=1}^{24} (y_{i,simu} - y_{i,mes})^2 + \\
 & \frac{1}{g_\theta^2} \sum_{i=1}^{24} (\theta_{i,simu} - \theta_{i,mes})^2 + \\
 & \frac{1}{g_\phi^2} \sum_{i=1}^{24} (\phi_{i,simu} - \phi_{i,mes})^2
 \end{aligned} \tag{6.26}$$

Die Faktoren g_z , g_y , g_θ und g_ϕ werden benötigt, um die Winkel- und Linearencoder in ihrem Einfluß auf die Strahlage zu berücksichtigen. Mit $g_\theta = 1$, $g_\phi = 2$, $g_z = g_y = 19$ sind diese Faktoren so gewählt, daß die Änderung eines Encoderwertes mit der resultierenden Verschiebung des Laserstrahls bezogen auf die Mitte des Verteilerrades gleich gewichtet wird: z.B. bewirkt eine Änderung im Winkel θ des Superspiegels um einen Count in 2.7 m Entfernung eine Verschiebung des Laserstrahls um 0.094 mm. Um eine solche Verschiebung mit dem z -Schlitten des Superspiegels zu erreichen, muß dieser um 19 Counts gefahren werden.

Das Ergebnis der Rechnung zeigt die Abb. 34. Dargestellt ist die Abweichung zwischen den gemessenen und den mit der Simulation unter Verwendung der berechneten Parametern bestimmten Encoderwerten. Die Residuen zeigen nur noch eine geringe Reststruktur. Der Sprung bei Sektor Nr. 12 für den Encoder ϕ ist, verglichen mit dem ausgenutzten Fahrbereich von ca 30000 Counts¹⁰ vernachlässigbar klein.

Die Einstellgenauigkeit der Rohrspiegel beträgt ca. 1 bis 3 mm. Sie wurde in 5 m Abstand vom Verteilerrad gemessen als die Abweichung des reflektierten Laserstrahls von der Sollposition. Solche geringen Abweichungen sind nicht zu vermeiden und zeigen sich somit in einer Streuung der Encoderwerte. Diese Abweichungen entsprechen genau der hier gefundenen Streuung der Residuen. Dies ist ein Hinweis, daß das Minimierungsverfahren zur Bestimmung der Fitparameter $(x, y, \theta, \phi)_{VR}$ und $(Z_{enc}, Y_{enc}, \theta_{enc}, \phi_{enc}, x, y, z)$ ein sinnvolles Ergebnis liefert.

¹⁰Um alle Sektoren von 1 bis 24 anzufahren, ist ein derart großer Winkelbereich abzudecken.

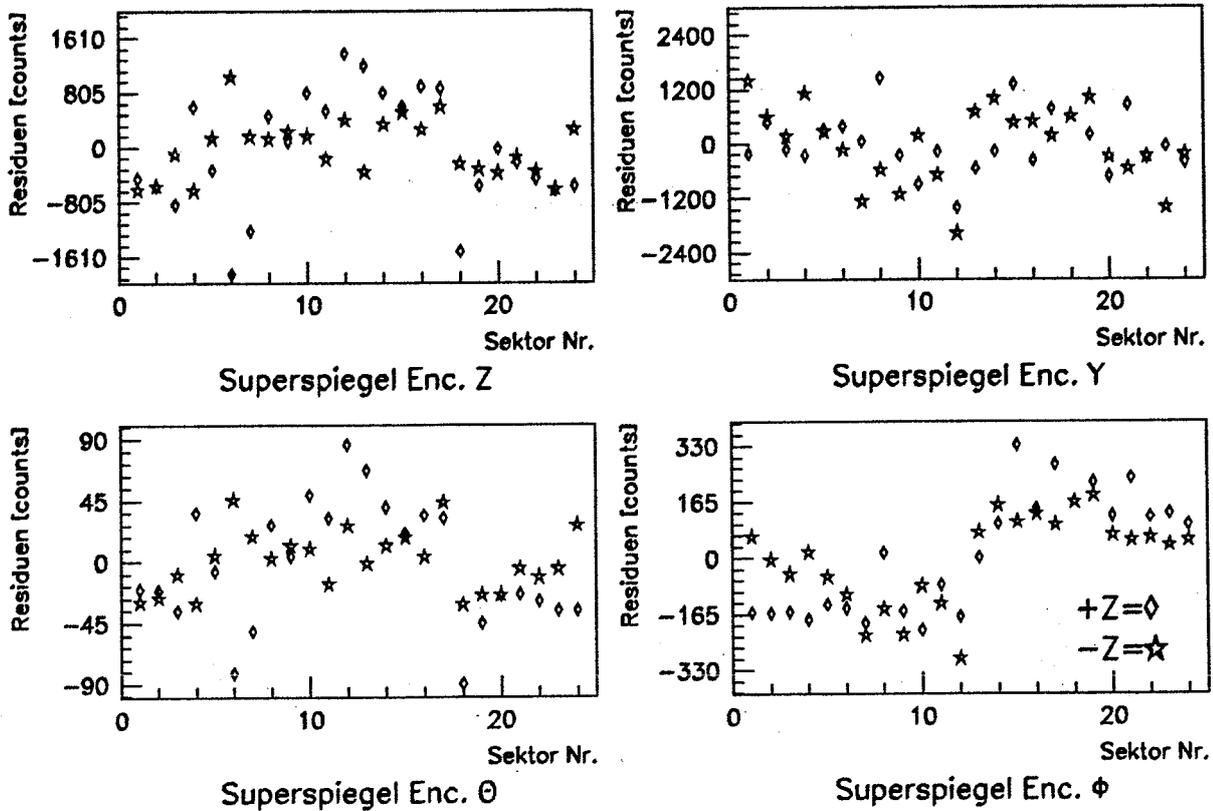


Abb. 34: Position des Verteilerrades: Dargestellt sind Residuen aus dem Fit der gemessenen an die mit der Simulation bestimmten Encoderwerte (vgl. Text).

Die für die Position und Orientierung des Verteilerrades gefundenen Parameter sind in der Tabelle 6 dargestellt. Die Werte sind mit dem Superspiegel auszugleichen und liegen somit im tolerierbaren Bereich; keiner der Parameter zeigt signifikante Abweichungen von den Sollwerten. Dies zeigt, daß das Verteilerrad trotz der hohen Anforderungen an die Justierung mit der benötigten Präzision aufgebaut werden kann.

Fit-Parameter		
Parameter der Verteilerräder	-Z - Seite	+Z - Seite
X-Pos. [mm]	-2.76	3.69
Y-Pos. [mm]	5.49	-4.61
Drehwinkel um X [mrad]	-3.01	0.87
Drehwinkel um Y [mrad]	0.72	-2.82

Tabelle 6: Rekonstruierte Position der Verteilerräder: Die aus der Minimierung gewonnene Position der Verteilerräder zeigt eine geringe aber, tolerierbare Abweichung von der Sollposition (0,0,0,0). Der vom Programm MINUIT angegebene Fehler für diese Parameter ist kleiner als 0.1 Prozent.

7 Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden der Aufbau und die Tests zur Steuerung der Laserstrahlen im Kalibrationssystem der OPAL-Jetkammer beschrieben.

Zur Kalibration der OPAL-Jetkammer werden UV-Laserstrahlen eingesetzt. Dazu werden Nd:YAG-Laser ($\lambda = 1064\text{nm}$, frequenzvervierfacht auf $\lambda = 266\text{nm}$) im gepulsten Modus eingesetzt. Die Pulsdauer beträgt 3 ns , die Wiederholungsrate (Schußrate) ist 5 Hz . Die UV-Strahlen werden mit einem komplizierten Spiegelsystem beidseitig in die Jetkammer geleitet. Vor Eintritt in die Kammer werden die Strahlen mit Strahlteilern in Doppelstrahlen mit genau bekannten Abständen und Divergenzen aufgespalten.

Für Präzisionsmessungen der Kalibrationsgrößen (wie z.B. die Driftgeschwindigkeit und die verschiedenen Zeitnullpunkte) ist eine präzise Steuerung der Laserstrahlen notwendig. Dazu werden die Strahlagen mit jeweils 2 Positionsmonitoren für jeden der 48 Strahlwege auf wenige μm genau gemessen und mit dem Superspiegel gesteuert. Die Ortsinformation (RMS der Ortsverteilung $\approx 80\ \mu\text{m}$) dieser Positionsmonitore ist nicht linear. Folgende Ergebnisse wurden erzielt:

- Es wurde gezeigt, daß das zur Linearisierung der Ortsinformation eingesetzte Iterationsverfahren konvergiert. Nach nur 6 Iterationen beträgt die Abweichung vom Grenzwert der Iteration nur noch 0.1% .
- Es wurden Programme zum Einfädeln des Laserstrahls entwickelt und auf dem Mikroprozessorsystem implementiert.
- Es wurde eine Simulation des Kalibrationssystems und Programme zur automatischen Steuerung der Strahlage entwickelt und getestet.
 - Der verwendete Algorithmus zur Steuerung basiert auf der Anwendung einfacher 2×2 Matrizen (Rotationsmatrizen) auf die gemessenen Ortspositionen.
 - Diese Matrizen wurden mit der Simulation des Kalibrationssystems berechnet und mit gemessenen Matrizen verglichen. Es wurden keine signifikanten Abweichungen gefunden.
- Testmessungen ergaben, daß der Laserstrahl auf dem Strahlteiler mit einer Genauigkeit von $\pm 250\ \mu\text{m}$ gesteuert werden kann. Dies ist um einen Faktor 2 besser als gefordert.
- Mit der Simulation wurde die Stabilität des Korrekturverfahrens gegenüber Abweichungen der Steuerparameter von den idealen Werten überprüft. Der Algorithmus erwies sich gegenüber Änderungen des Verzerrungsparameters k von bis zu 30% als sehr robust. Die Steuermatrizen können ohne Einfluß auf die Anzahl der nötigen Iteration um 15° „verdreht“ werden.
- Die mechanischen Komponenten des Systems sind mit großem gegenseitigen Abstand aufgebaut. Sie müssen daher genau justiert werden. Die Untersuchung der Anforderungen an diese Justierung ergab, daß der Superspiegel Verschiebungen von einigen mm und Verkippungen von einigen mrad, insbesondere des Verteilerrades, auszugleichen vermag.
- Über eine Anpassung simulierter Encoderwerte an die gemessenen Encoderwerte des Superspiegels durch Variation geeigneter Parameter des Simulationsprogramms konnten Verschiebungen und Verkippungen des Verteilerrades bestimmt werden. Die so gefundenen Abweichungen zeigen nur geringe – mit dem Superspiegel kompensierbare – Abweichungen von den Sollwerten.

Seit August 1989 arbeitet das Kalibrationssystem wie geplant und wurde bereits mehrfach erfolgreich zur Kalibration der Jetkammer eingesetzt. Die besonderen Eigenschaften der Laserstrahlen,

wie eine gerade Spur bei bekannten Positionen der Strahlen, und eine mögliche hohe Statistik, ermöglichen eine detaillierte Studie der Jetkammer.

Verzeichnis der Abbildungen

1	Der OPAL Detektor	3
2	R- ϕ Schnitt durch einen Sektor der OPAL-Jetkammer	6
3	Ionisation des Kammergases	7
4	Skizze zur Bestimmung des Lorentzwinkels	8
5	r-z Schnitt durch die OPAL Jetkammer	9
6	Übersicht über das Kalibrationssystem	11
7	Optische Bank	12
8	Der Superspiegel.	13
9	Der Rohrspiegel	15
10	Das Verteilerrad	16
11	Der Laserkegel	17
12	Szintillationsmonitore SLM	17
13	Strahlteiler zur Erzeugung eines Doppelstrahls	18
14	Photoeffekt bei Lateral-Effekt-Dioden (LED).	20
15	Modell der Lateral-Effekt-Diode (LED).	21
16	Verzerrung der LED Ortsinformation	22
17	Ableitung der Korrekturfunktion	22
18	Ladungsverteilung	24
19	Blockschaltbild der Elektronik	25
20	Prinzip des Strahlengangs	27
21	Modell des Strahlengangs	27
22	Flußdiagramm der Strahlkorrektur	29
23	Prozeßkommunikation	34
24	Simulation	35
25	Labora Aufbau zum Test des Algorithmus	36
26	Reproduzierbarkeit vorgegebener Strahllagen	38
27	Variation des Verzerrungsparameters k	39
28	Variation der Matrixelemente	39
29	Ortsschwankungen des Laserstrahls	40
30	Simulation der Reflexion eines Strahls im Rohr	42
31	Kreuz bei Reflexion	42
32	Einfluß einer Dejustierung (Verschiebung) des Verteilerrades	44
33	Einfluß einer Dejustierung (Drehung) des Verteilerrades	44
34	Position des Verteilerrades: Residuen des Fits.	46

Verzeichnis der Tabellen

1	Fahrbereiche des Superspiegels	14
2	Nichtlinearität der Lateral-Effekt-Diode	23
3	Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Matrizen	30
4	Einfädeln des Laserstrahls mit SLM: Richtungszuordnung	32
5	Veränderung der Steuermatrix bei Reflexion	41
6	Rekonstruierte Position der Verteilerräder	46

Literaturverzeichnis

- [Bad84] H Badewitz;
Diplomarbeit; Universität Bonn; BONN-IR-84-24 (1984)
- [Bie89] O. Biebel;
Diplomarbeit; Universität Bonn; BONN-IR-89-54 (1989)
- [Bro84] Bronstein, Semendjajew;
Taschenbuch der Mathematik; Ergänzungsband (1984); ISBN: 3-87 144-493-6
- [Bug90] S. Bug;
Diplomarbeit; in Vorbereitung
- [Eyr90] A. Eyring; private Mitteilungen
- [Fis86] H.M. Fischer et al.;
The Opal Jetchamber Full Size Prototype; Nucl. Instr. and Meth. A252 (1986) 331
- [For83] O. Forster;
Analysis I; Lehrbuch der Mathematik; ISBN 3-528-37244-9
- [Groß90] S. Groß; private Mitteilungen
- [Hau88] M. Hauschild;
Dissertation; Universität Bonn, BONN-IR-88-57 (1988)
- [Hau89] M. Hauschild; private Mitteilungen
- [Heu88] R.D. Heuer, A. Wagner (OPAL Jet Chamber Group);
The OPAL-Jetchamber; Nucl. Instr. and Meth. A265 (1988), 11
- [Hil80] H.J.Hilke;
On the formation and application of LASER ionisation tracks in gases;
Nucl. Instr. and Meth. 174 (1980) 145-149
- [Kle88] M. Klein;
Diplomarbeit; Universität Bonn; BONN-IR-88-18 (1988)
- [Klk84] K. Kleinknecht;
Detektoren für Teilchenstrahlung; Stuttgart: Teubner Studienbücher 1984
- [Koch90] J. Koch;
Diplomarbeit; Universität Bonn; BONN-IR-90-12 (1990)
- [Koe76] W. Koechner;
Solid-State Laser Engineering; New York 1976
- [Las90] A.Eyring, S.Gross;
Beschreibung der Elektronik des LASER-Kalibrationssystems;
Universität Bonn (1990); in Vorbereitung
- [Luc90] U. Lucas;
Diplomarbeit; in Vorbereitung
- [Mar88] G.Maringer;
Diplomarbeit; Universität Bonn, BONN-IR-88-33 (1988)

- [Mar89] G.Maringer; private Mitteilungen
- [Mich88] Annika Michels;
Diplomarbeit; Universität Bonn, BONN-IR-86-03 (1986)
- [Minuit] CERN-Computer-Centre Program Library GENLIB D506
- [OPAL83] OPAL Collaboration;
The OPAL Detector Technical Proposal; CERN/LEPC/83-4 (1983)
- [OPAL90] OPAL Collaboration;
The OPAL Detector at LEP; in Vorbereitung
- [OS9-Sy] Microware Systems Corporation;
OS-9 Operating System Manuals
- [OS9-Ln] Microware Systems Corporation;
OS-9 Language System Manuals
- [OS9-In] Peter Dibble;
OS-9 Insights (an advanced programmers guide to OS-9/68000);
ISBN: 0-918035-0105
- [VIP89] K. Hohnscheid, J. Manns;
Dokumentation zum SAPHIR Online System SOS; Band 5: VIP Handbuch;
Universität Bonn, BONN-MS-89-06 (1989)
- [Rol89] A. Rollnik; private Mitteilungen
- [Rahn88] W. Rahn;
Diplomarbeit; Universität Bonn, BONN-IR-88-13 (1988)
- [Sad80] B. Sadoulet;
Fundamental Processes In Drift Chambers;
International Conference On Experimentation At LEP, Uppsala (1980)
- [Sauli77] F. Sauli;
Principles of Operation of Multiwire Proportional and Drift Chambers;
CERN-77-09 (1977)
- [Schr87] S. Schreiber;
Diplomarbeit; Universität Bonn; BONN-IR-87-26 (1987)
- [Schr89] S. Schreiber; private Mitteilungen;
- [Sim89] A. Simon; private Mitteilungen;
- [Scha85] D. Schaile;
A Simultaneous Hit Finding and Timing Method for Pulse Shape Analysis of Drift
Chamber Signals;
Nucl. Instr. and Meth. 242 (1986) 247
- [Wen89] M. Wendt;
Diplomarbeit; Universität Bonn; BONN-IR-89-48 (1989)
- [Wolf90] B. Wolf;
Diplomarbeit; BONN-IR-90-41 (1990);