Ein Drahtvermessungssystem für die Driftkammern des HERMES–Experiments

Diplomarbeit

von

Andreas Gute

Physikalisches Institut
der
Friedrich–Alexander–Universität
Erlangen–Nürnberg

15. Dezember 1994

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung

Anfang dieses Jahrhunderts gelangte man zu der Erkenntnis, daß Atome aus negativ geladenen Hüllenelektronen und positiv geladenen Kernen aufgebaut sind. Diese Kerne bestehen aus Protonen und Neutronen, die aufgrund der starken Wechselwirkung zusammengehalten werden. Teilchen, welche dieser Wechselwirkung unterliegen, bezeichnet man als Hadronen. Mit Hilfe immer aufwendigerer Experimente gelang es, eine Vielzahl verschiedener Hadronen zu erzeugen, was wiederum ein Zeichen dafür war, daß die Hadronen ihrerseits aus kleineren Bausteinen aufgebaut sind, die als Quarks bezeichnet werden. Nach dem heutigen Wissensstand bilden Quarks, zusammen mit den Leptonen und Austauschbosonen, die Grundbausteine der Materie. Diese fundamentalen Teilchen können in zwei Gruppen unterteilt werden, wobei die Fermionen (Leptonen und Quarks) halbzahligen, die Bosonen ganzzahligen Spin besitzen.

Von Interesse ist insbesondere die Frage, inwieweit die Spins von Valenzquarks, Seequarks und Gluonen, den Bausteinen der Nukleonen, zum Gesamtspin von Proton und Neutron beitragen. In diesem Zusammenhang wird das HERMES–Experiment, das am Deutschen Elektronen-Synchrotron (DESY) in Hamburg während der Winterpause 1994/95 aufgebaut wird, mit verschiedenen Messungen dazu beitragen, den Spin der Nukleonen besser zu verstehen. Der dafür verwendete Detektor ist ein Magnetspektrometer, mit dem die an einem internen Gastarget gestreuten longitudinal polarisierten Positronen in Abhängigkeit vom Streuwinkel und der Energie gemessen werden. Dies ermöglicht es, die spinabhängigen Strukturfunktionen der Nukleonen zu bestimmen. Ziel des HERMES–Experiments wird es sein, die Messungen mit einer sehr großen Genauigkeit durchzuführen. Dafür ist es notwendig, mit einer hohen Statistik zu messen und zusätzlich die systematischen Fehler so klein wie möglich zu halten.

Ein systematischer Meßfehler ist zum Beispiel dadurch gegeben, daß der Ort der zu beobachtenden Teilchen beim Durchgang durch einen Detektor nicht exakt gemessen werden kann. Diese Meßungenauigkeit bezeichnet man als Ortsauflösung eines Detektors. Ist der Ort einer Detektorkomponente absolut im Raum verschoben, dann kommt zu der Fehlmessung aufgrund der Ortsauflösung des Detektors noch ein weiterer systematischer Fehler hinzu. Deshalb ist es erforderlich, die Absolutpositionen einer jeden Komponente so genau wie möglich zu bestimmen. Aus diesem Grund wird im HERMES–Experiment ein permanentes Laser–Vermessungssystem eingebaut. Für dieses werden an jedem Detektor zwei bewegliche Positionsmarken befestigt, mit deren Hilfe die Absolutposition des Detektors gemessen werden kann.

Allein die Kenntnis der Position des Detektors ist jedoch nicht ausreichend, da zusätzlich die einzelnen Drahtpositionen der Driftkammern, die in die Ortsbestimmung der zu messenden Teilchen mit eingehen, gemessen werden müssen. Deshalb wurde im Rahmen dieser Diplomarbeit ein Meßsystem aufgebaut, das es ermöglicht, die absoluten Drahtpositionen der hinteren HERMES–Driftkammern zu bestimmen und eine Anbindung an das Laser–Vermessungssystem durchzuführen.

In dem folgenden Kapitel wird zunächst das HERMES–Experiment vorgestellt, danach wird auf die verwendeten Driftkammern und deren Funktionsweise eingegangen. Anschließend werden verschiedene Vermessungsmethoden für Detektoren diskutiert. Der mechanische Aufbau des Meßsystems wird im fünften Kapitel erläutert, wonach die Beschreibung der verwendeten Elektronik und des für die direkte Rechnerauslese notwendige Datennahmesystemes folgen. Im sechsten Kapitel werden die Meßergebnisse vorgestellt, analysiert und in ein Datenformat gebracht, das es ermöglicht, die Informationen in den späteren Analyseprogrammen weiterzuverarbeiten.

2 Das HERMES–Experiment

2.1 Theoretischer Hintergrund

Das HERMES–Experiment ([HER 90], [HER 93]) hat sich zum Ziel gesetzt, mit sehr großer Genauigkeit die innere Spinstruktur der Nukleonen zu untersuchen. Dazu wird ein longitudinal polarisierter Elektronen– bzw. Positronenstrahl an einem internen polarisierten Gastarget, welches je nach Fragestellung mit Wasserstoff, Deuterium oder ^{3}He gefüllt ist, tiefinelastisch gestreut. Die Information über diese Spinstruktur ist in den Strukturfunktionen $g_1(x, Q^2)$ und $g_2(x, Q^2)$ enthalten, wobei x die Bjorkensche Skalenvariable und Q^2 das negative Quadrat der invarianten Masse des ausgetauschten virtuellen Photons ist. In einem Bezugssystem, in dem das Targetatom eine so große Geschwindigkeit besitzt, daß die Transversalimpulse und die Ruhemassen der Quarks vernachlässigt werden können ('infinit momentum frame'), kann x als Impulsbruchteil eines Quarks am Gesamtimpuls des Nukleons interpretiert werden.

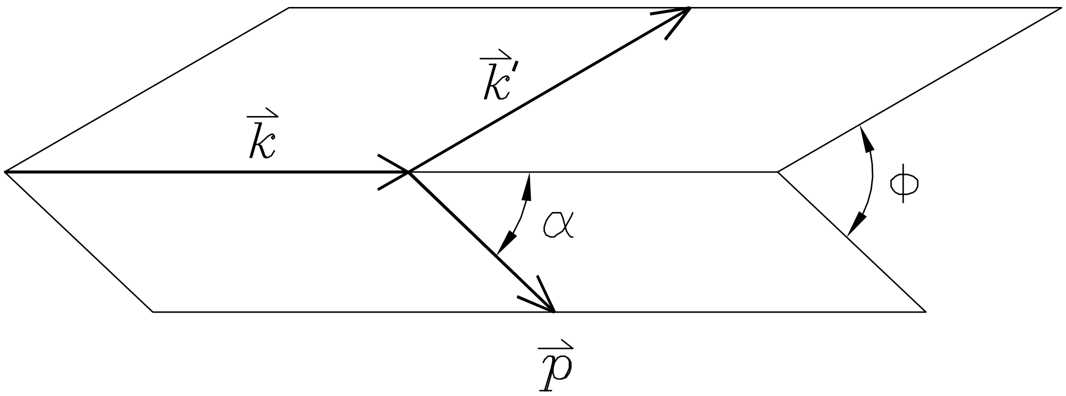

Abb. 2.1: *Erläuterung der Winkel α und ϕ.*

Wenn man, wie in Abbildung 2.1 veranschaulicht, α als den Winkel zwischen dem Impulsvektor $\vec{k}$ des einfallenden geladenen Leptons (im folgenden immer ohne Beschränkung der Allgemeinheit als Positron bezeichnet) und dem Polarisationsvektor $\vec{p}$ des Targets definiert, und man weiterhin den Winkel zwischen der Polarisationsebene $(\vec{k}, \vec{p})$ und der Ebene, die von den Impulsvektoren des einfallenden und des gestreuten Positrons aufgespannt wird, mit ϕ bezeichnet, dann ist der spinabhängige Anteil des tiefinelastischen Wirkungsquerschnitts für zwei entgegengesetzte Targetpolarisationen gegeben durch:

$$\frac{d^3(\sigma(\alpha)-\sigma(\alpha+\pi))}{dx\,dy\,d\phi} = \frac{e^4}{4\pi^2 Q^2}\Bigg[\cos\alpha\left(\left[1-\frac{y}{2}-\frac{y^2}{4}\gamma^2\right]g_1(x,Q^2)-\frac{y}{2}\gamma^2 g_2(x,Q^2)\right) - \sin\alpha\cos\phi\sqrt{\gamma^2(1-y-\frac{y^2}{4}\gamma^2)}\left(\frac{y}{2}g_1(x,Q^2)+g_2(x,Q^2)\right)\Bigg]. \quad (2.1)$$

Hierbei ist $\nu = E - E'$ der Energieübertrag des virtuellen Photons und $-Q^2$ seine invariante Masse. $x = Q^2/2M\nu$ und $y = \nu/E$ sind die Bjorkenschen Skalenvariablen, wobei M

die Masse des Nukleons und $\gamma = \sqrt{Q^2}/\nu$ ist.

Experimentell kann man die beiden Strukturfunktionen $g_1(x,Q^2)$ und $g_2(x,Q^2)$ gewinnen, indem man zwei Messungen mit unterschiedlicher Targetpolarisation durchführt, zum Beispiel mit longitudinal ($\alpha = 0$) und transversal polarisiertem Target ($\alpha = \pi/2$). Die Strukturfunktion $g_1(x,Q^2)$ hat im Quark–Parton–Modell eine anschauliche Bedeutung. Sie kann durch die Wahrscheinlichkeit $q_f^{\pm}(x,Q^2)$ ausgedrückt werden, mit der man einen Quarktyp mit paralleler (+) oder antiparalleler (−) Spinausrichtung zur Spinrichtung des Nukleons findet:

$$g_1(x,Q^2) = \frac{1}{2}\sum_f e_f^2 \left[q_f^+(x,Q^2) - q_f^-(x,Q^2)\right] \; . \tag{2.2}$$

Dabei ist e_f die Ladungszahl des Quarks mit Flavor f.

Die Strukturfunktion $g_2(x,Q^2)$ kann nicht auf solch anschauliche Weise beschrieben werden.

Durch Messung der spinabhängigen Strukturfunktionen können theoretische Vorhersagen überprüft werden, die Angaben über die Momente der Strukturfunktionen machen. Diese Momente werden als Summenregeln bezeichnet. Die grundlegendste Summenregel setzt die Differenz der Strukturfunktionen $g_1^p(x)$ des Protons und $g_1^n(x)$ des Neutrons in Beziehung zu den Kopplungskonstanten g_A und g_V der schwachen Wechselwirkung. Sie wird als Bjorken–Summenregel [Bjo 66] bezeichnet und lautet unter Berücksichtigung von QCD–Korrekturen in führender Ordnung der Kopplungskonstanten der starken Wechselwirkung α_s ([Kod 79], [Kod 80]):

$$I_1^p - I_1^n \;=\; \int_0^1 [g_1^p(x) - g_1^n(x)]\, dx \;=\; \frac{1}{6}\frac{g_A}{g_V}\left(1 - \frac{\alpha_s}{\pi}\right) \;=\; 0.191 \pm 0.002 \; . \qquad (Q^2 = 4.6 \text{ GeV}^2) \tag{2.3}$$

Aus der Annahme, daß das s–Quark nicht zum Nukleonenspin beiträgt, erhält man die Ellis–Jaffe–Summenregel [Ell 74], welche eine theoretische Vorhersage der ersten Momente der Strukturfunktionen $g_1(x)$ liefert. Demnach lautet die Ellis–Jaffe–Summenregel des Protons [Jaf 90]:

$$I_1^p \;=\; \int_0^1 g_1^p(x)\, dx \;=\; 0.175 \pm 0.018 \; . \tag{2.4}$$

In Tabelle 2.1 sind einige experimentelle Ergebnisse aufgelistet. Abbildung 2.2 zeigt die Daten für $xg_1^p(x)$ und das Integral $\int_x^1 g_1^p(x)dx$ als Funktion von x für das SMC–Experiment [Mon 94]).

Tab. 2.1: *Zusammenstellung einiger experimenteller Ergebnisse des ersten Moments der Strukturfunktion $g_1(x)$ für verschiedene Targets.*

Summenregel	Gruppe	experimenteller Wert	Lit.
$\int_0^1 g_1^p(x, Q^2)$	E143	$0.129 \pm 0.004(stat.) \pm 0.009(syst.)$	[Abe 94]
$\int_0^1 g_1^p(x, Q^2)$	SMC	$0.136 \pm 0.011(stat.) \pm 0.011(syst.)$	[Mon 94]
$\int_0^1 g_1^n(x, Q^2)$	E142	$-0.022 \pm 0.011(stat. + syst.)$	[Ant 93]
$\int_0^1 g_1^d(x, Q^2)$	SMC	$0.023 \pm 0.020(stat.) \pm 0.015(syst.)$	[Ade 93]

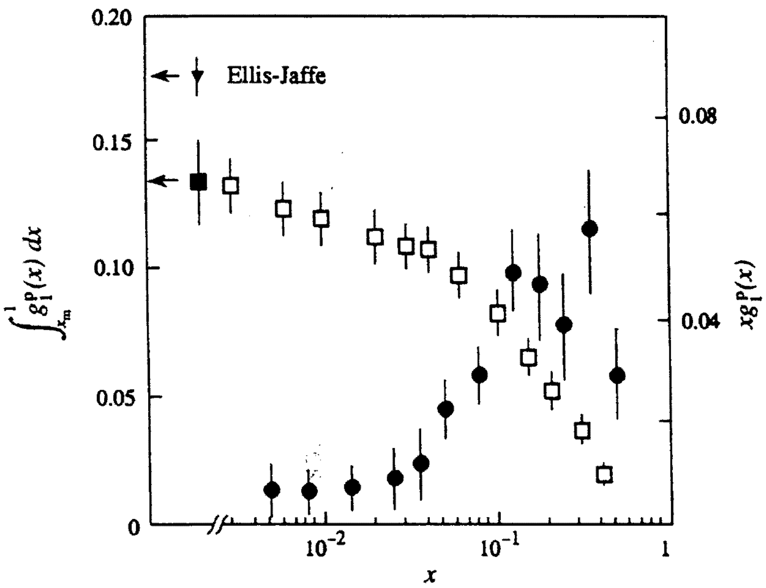

Abb. 2.2: *Die ausgefüllten Kreise, die sich auf die rechte Achse beziehen, zeigen $xg_1^p(x)$ bei $Q_0^2 = 10GeV^2$. Die Quadrate geben $\int_{x_m}^1 g_1^p(x)dx$ an, wobei x_m jeweils den Wert von x am unteren Ende des aktuellen Bins darstellt. Es sind lediglich statistische Fehler gezeigt. Das ausgefüllte Quadrat gibt den aktuellen Wert der SMC Kollaboration von $\int_0^1 g_1^p(x)dx$ an, worin statistische und systematische Fehler quadratisch addiert berücksichtigt sind. Zum Vergleich ist die theoretische Vorhersage der Ellis–Jaffe Summenregel angegeben.*

Die ersten Momente der Strukturfunktionen $g_2(x)$ werden als Burkhardt–Cottingham–Summenregel [Bur 76] bezeichnet. Für diese gilt:

$$I_2 = \int_0^1 g_2(x)\,dx = 0\,. \tag{2.5}$$

Aufgrund der Tatsache, daß die Messungen der Burkhardt–Cottingham–Summenregeln mit viel größeren Schwierigkeiten verbunden sind, als die der Ellis–Jaffe–Summenregeln, liegen zum Beispiel für $g_2^n(x)$ noch keine experimentellen Daten vor. Bereits im ersten Jahr der Datennahme wird das HERMES–Experiment mit einem ^{3}He Target weltweit die ersten Messungen dieser Strukturfunktion durchführen.

Darüber hinaus kann man mit HERMES noch weitere Strukturfunktionen messen. So erhält man aus der Streuung eines unpolarisierten Positronenstrahls an einem Spin–1 Deuteriumtarget die Strukturfunktionen $\Delta(x)$ [Jaf 89a] und $b_1(x)$ ([Hoo 89], [Jaf 89b]).

Weiterhin ist es möglich, mit einem unpolarisierten Positronenstrahl Informationen über die Seequarkverteilungen zu erhalten. Das NMC–Experiment hat zum Beispiel in einer Messung gezeigt, daß die Seequarkverteilung für die leichten Quarks nicht flavor–symmetrisch ist, da die Pionenwolke um das Nukleon einen Überschuß von $\overline{d}$ gegenüber $\overline{u}$ Quarks produziert. Zusätzlich ist nach Eichten et al. [Eic 91] die Pionenemission von Valenzquarks, wie zum Beispiel $u \rightarrow \pi^+ d$, eine Ursache für eine starke Flavor–Asymmetrie. Eine solche Asymmetrie verursacht unterschiedliche Pionenproduktionsraten bei der Streuung von unpolarisierten Positronen an Wasserstoff oder Deuterium, welche mit HERMES gemessen werden können.

2.2 Der experimentelle Aufbau

Das HERMES–Experiment wird in der Osthalle des HERA Speicherrings, einer Hadronen–Elektronen–Ring–Anlage, am Deutschen Elektronen–Synchrotron DESY, in Hamburg, während der Winterpause 1994/95 aufgebaut. Im Frühjahr 1995 wird mit der Datennahme begonnen.

In dem HERA–Speicherring (vgl. Abb. 2.3) werden Positronen und Protonen auf sehr hohe Energien beschleunigt ($E_{max}(e^-) = 35GeV$, $E_{max}(p) = 820GeV$). Ursprünglich wurde HERA zur Beschleunigung von Elektronen gebaut, wobei der vorgesehene Elektronenstrom von 58 mA jedoch aufgrund von Raumladungseffekten nicht erreicht werden konnte. Deshalb hat man sich 1994 dazu entschlossen, anstelle von Elektronen für einige Zeit mit Positronen zu arbeiten, wodurch diese Probleme umgangen werden konnten.

Im HERMES–Experiment werden longitudinal polarisierte Positronen an einem polarisierten internen Gastarget gestreut. Der Protonenring durchläuft den HERMES–Detektor in einer separaten Vakuumkammer und wird nicht für die Messungen verwendet.

Eine transversale Positronenpolarisation baut sich in einem Speicherring, sobald eine möglichst störungsfreie Strahloptik eingestellt ist, automatisch auf. Die Ursache hierfür ist eine Asymmetrie in der Synchrotronstrahlung, die von geladenen Teilchen ausgesandt wird, wenn diese durch Dipolmagneten auf eine Kreisbahn abgelenkt werden. Diese Synchrotronstrahlung hat die Eigenschaft, daß sie bei ca. jedem 10^{10}ten Mal zu einem Positronenspinübergang (Spin–Flip) führt. Die Wahrscheinlichkeit, daß sich der Positronenspin antiparallel zu dem Magnetfeld der Dipole ausrichtet, ist größer, als eine parallele Ausrichtung. Deshalb kommt es zu einer effektiven Polarisation der Positronen, falls die äußeren

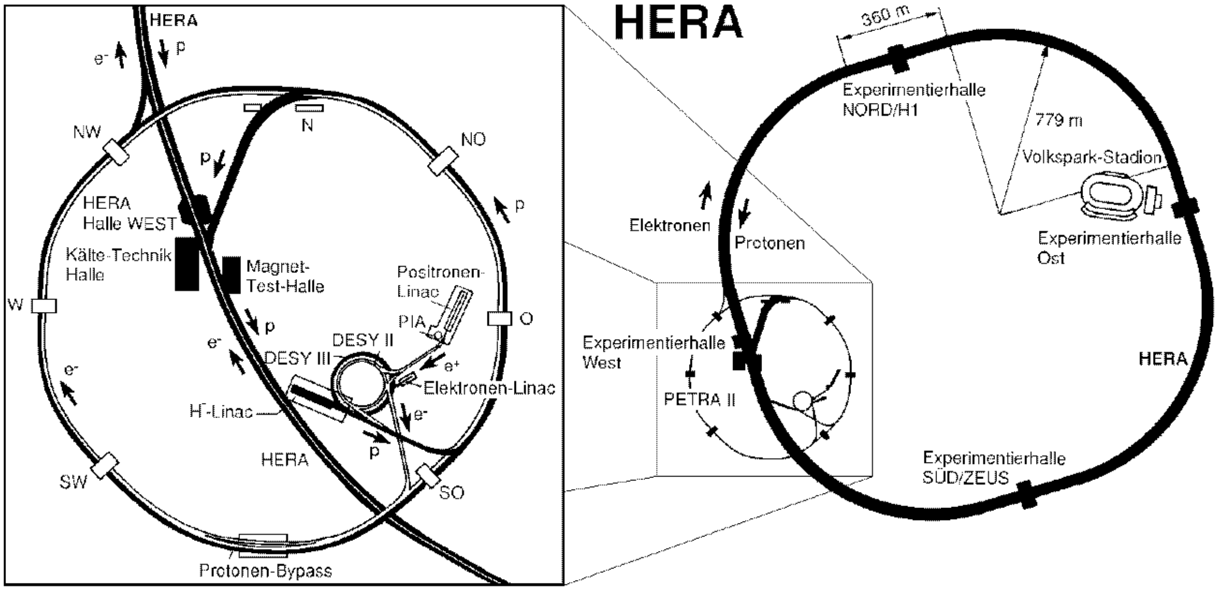

Abb. 2.3: *Speicherring HERA am Deutschen Elektronen Synchrotron DESY in Hamburg.*

Störeinflüsse, die depolarisierend wirken, nicht zu groß sind. Dies wird als Sokolov–Ternov–Effekt bezeichnet.

Da im Bereich der Targetzelle der Positronenspin longitudinal und nicht transversal ausgerichtet werden muß, sind zusätzlich Spinrotatoren notwendig. Dazu werden vor dem Experiment die Positronen von transversaler in longitudinale Polarisation und nach dem Experiment von longitudinaler in transversale Polarisation gedreht. Im Mai 1994 konnte weltweit das erste Mal eine longitudinale Positronenpolarisation in einem Speicherring gezeigt werden [Bar 94]. Der Meßwert lag mit 70% deutlich über dem Wert von 50% , der als Berechnungsgrundlage für Meßzeiten und statistische Fehler in das HERMES–Proposal eingegangen ist.

Das interne polarisierte Gastarget, das zum ersten Mal bei HERMES im Rahmen eines großen Experiments eingesetzt wird, besteht aus einer Speicherzelle, in die polarisierte H, D oder ^{3}He Atome injiziert werden. Die Speicherzelle hat die in Abbildung 2.4 skizzierte Form und bewirkt eine ca. hundertmal höhere Targetflächendichte, als ein normales Gas Jet Target.

Die Gasdichte ist in der Mitte der Speicherzelle am größten und nimmt zu den seitlichen Öffnungen hin annähernd linear ab. Gegenüber den herkömmlichen kryogenischen festen polarisierten Targets hat ein solches Gastarget folgende Vorteile :

- Die absolute Polarisation ist höher, da bei H und D nahezu 100% der Targetnukleonen polarisiert sind und nicht, wie zum Beispiel in einem C_4H_9OH Target, nur ca. 14%. Deshalb ist der Untergrund der Messung, der von unpolarisiertem Targetmaterial verursacht wird, viel geringer.

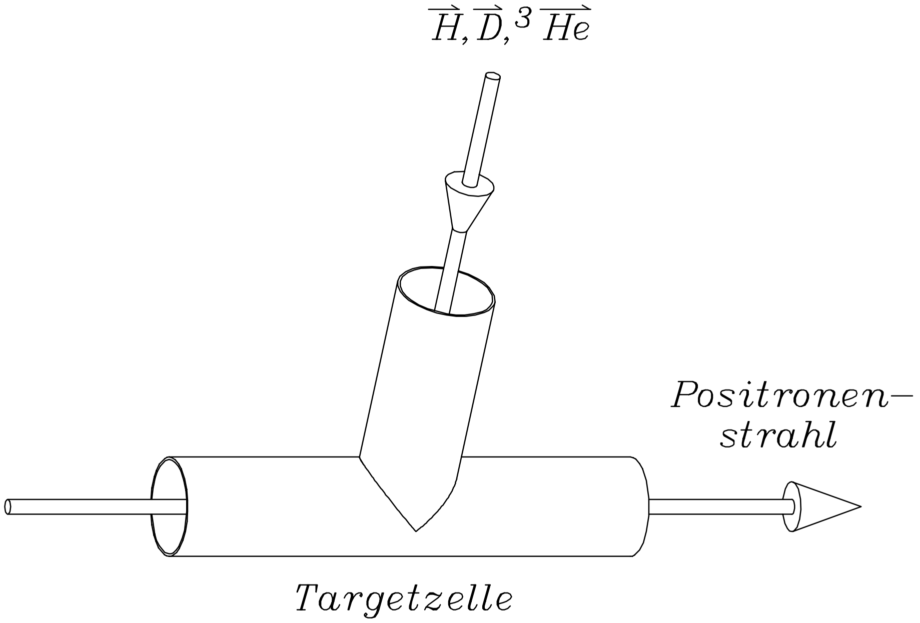

Abb. 2.4: *Schematische Darstellung der Speicherzelle des internen Gastargets, die eine Querschnittsfläche von* 29.0 $\times$ 9.8 *mm^2 und eine Länge von* 400 *mm besitzt.*

- Die Polarisationsrichtung kann sehr schnell (ca. 50 Hz) umgeschaltet werden. Dadurch werden eventuelle zeitliche Veränderungen der Apparatur herausgemittelt, was kleinere systematische Fehler zur Folge hat.

Die bei der Streuung der Positronen an dem Gastarget erzeugten Teilchen, werden mit einem zur Strahlrohrebene symmetrischen, zweigeteilten Detektor analysiert. Bei diesem Detektor handelt es sich um ein Magnetspektrometer (vgl. Abb. 2.5), mit dem die Impuls- und Winkelverteilungen von verschiedenen Reaktionsprodukten (hauptsächlich der gestreuten e^+) gemessen werden. Dazu wird die Flugbahn der Teilchen vor dem Magneten mit Gasstreifendetektoren VC1/2 und Driftkammern FC1/2 bestimmt. Hinter dem Magneten werden dazu die hinteren HERMES–Driftkammern BC1-4 verwendet. Davon sind die Kammern BC1/2 direkt im Anschluß an den Magneten installiert. Die Kammern BC3/4 sind hingegen ca. 2 m weiter strahlabwärts eingebaut, da mit einem möglichst großen Abstand der beiden Meßpunkte eine genauere Spurrekonstruktion durchgeführt werden kann. Aus der Winkeländerung der Teilchenspur im Magneten kann man auf ihren Impuls zurückrechnen. Im Magneten selbst, dessen integrierte Flußdichte 1.3 Tm beträgt, sind zusätzlich Proportionalkammern installiert, um eine präzise Spurrekonstruktion im Magneten vornehmen zu können.

Zwischen den beiden hinteren Driftkammern ist ein Schwellen–Čerenkovzähler eingebaut, der zur Teilchenidentifizierung benötigt wird. Er ist mit CF_4 unter Atmosphärendruck gefüllt und erlaubt es Pionen zwischen 4.5 und 16 GeV nachzuweisen. Zur Pionenunterdrückung ist ein Übergangsstrahlungsdetektor installiert, der es ermöglicht, den Unterdrückungsfaktor 1:100 des Kalorimeters auf mehr als 1:10000 zu steigern. Der

Übergangsstrahlungsdetektor ist von zwei Hodoskopen umgeben, die einen schnellen Nachweis der geladenen Teilchen erlauben. Das hintere Hodoskop dient gleichzeitig als Preshower für das Kalorimeter. Mit Hilfe dieses Kalorimeters wird die Energie der Teilchen bestimmt. Falls in einem kleinen Bereich eine Energie größer als 4.5 GeV deponiert wurde, wird die erste Stufe eines Triggers ausgelöst.

Die an den Hüllenelektronen des Targets Bhabha–gestreuten Positronen werden mit dem Luminositätsmonitor in Koinzidenz mit den getroffenen Hüllenelektronen nachgewiesen. Damit kann die Luminosität des Experiments (L = Strahlstrom $\times$ Targetflächendichte) bestimmt werden. Dies ist für Messungen notwendig, in denen absolute Zählraten benötigt werden.

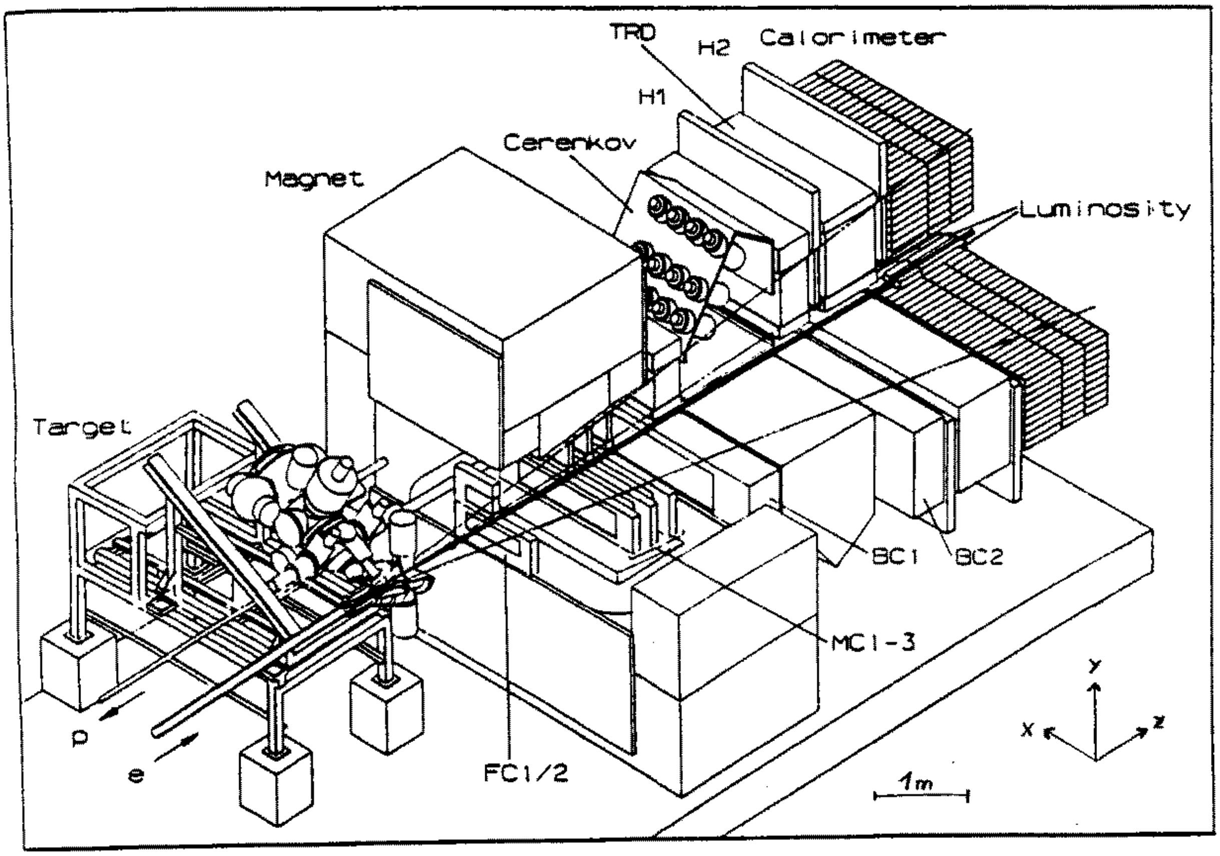

Abb. 2.5: *Der HERMES–Detektor.*

3 Ortsmessung mit Driftkammern

3.1 Die Entwicklung der Vieldrahtkammern

Nachdem G. Charpak et al. 1968 die erste Vieldrahtproportionalkammer vorgestellt haben [Cha 68], erkannte man schnell, daß die Vieldrahtdetektoren ein ausgezeichnetes Meßinstrument zur Ortsbestimmung von geladenen Teilchen in der Teilchenphysik darstellen. Diese sind aus vielen parallelen, dünnen Drähten aufgebaut, die von zwei Kathoden eingeschlossen werden. Sie arbeiten nach dem Prinzip des Proportionalzählrohrs, wobei die durch primäre Ionisation erzeugten Elektronen in der Nähe der Signaldrähte in Bereiche so hoher Feldstärke gelangen, daß sie zwischen zwei Stößen genügend kinetische Energie gewinnen, um ihrerseits Atome zu ionisieren. Bei den Proportionalkammern hat man festgestellt, daß der Ort der Teilchenbahn im Zusammenhang mit der Driftzeit steht. Fügt man zwischen zwei Signaldrähten der Proportionalkammer einen weiteren Felddraht ein, der auf negativem Potential liegt, dann vermeidet man zwischen den Signaldrähten einen Bereich sehr niedriger Feldstärke (vgl. Abb. 3.1). Bei einer solchen Driftkammer kann man aus der Driftzeit auf den Ort der Primärionisation zurückrechnen ([Wal 71],[Cha 70]).

Aufgrund der Möglichkeit, Vieldrahtkammern sehr großflächig zu bauen, werden sie in fast jedem Hochenergieexperiment eingesetzt. Auch in Anwendungen der Biologie, Astronomie oder Medizin haben Vieldrahtkammern mehr und mehr an Bedeutung gewonnen.

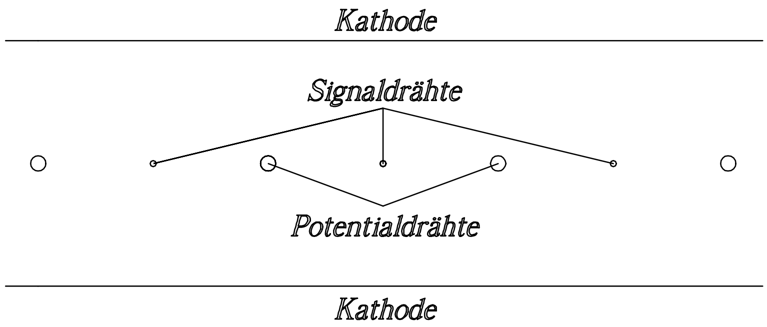

Abb. 3.1: *Schematische Darstellung des Aufbaus einer Driftkammer.*

3.2 Der Aufbau der Driftkammern BC1-4

Die Größe der Driftkammern ist durch den Akzeptanzwinkel des HERMES–Experiments vorgegeben.

Die vertikale Akzeptanz des Detektors, die zwischen 40 mrad und 140 mrad liegt, ist durch das Austrittsfenster des Targets und die Septumplatte im Magneten festgelegt. Die Septumplatte schirmt das Magnetfeld im Bereich des Protonen– und Positronenstrahlrohrs ab. Sie verhindert jedoch durch ihre Lage eine Messung im Akzeptanzbereich zwischen 0 und 40 mrad, wodurch die Zweiteilung des HERMES–Detektors, symmetrisch zur Strahlrohrebene, verursacht wird. Der horizontale Akzeptanzwinkel beträgt ± 170 mrad.

Berücksichtigt man einen zusätzlichen maximalen Ablenkwinkel von 100 mrad durch den Magneten (dies entspricht Positronen mit einer Minimalenergie von $4,5$ GeV), dann erhält man für die BC–Kammern die in Tabelle 3.1 zusammengefaßten aktiven Flächen, die von der Entfernung der Kammern zum Target abhängen:

Tab. 3.1: *Zusammenstellung der aktiven Flächen der Hermes Driftkammern.*

Driftkammer	Abstand vom Target	Aktive Fläche hor. x ver.
BC1/2	3950 mm – 4350 mm	1860 x 520 mm^2
BC3/4	5700 mm – 6100 mm	2880 x 710 mm^2

Die Driftkammern bestehen jeweils aus sechs Drahtebenen (vgl. Abb. 3.2):

U, US, X, XS, V, VS.

Dabei haben die X–Ebenen senkrechte Drähte und die U/V–Ebenen um $+/- 30°$ geneigte Drähte. Die jeweils zweite Ebene einer bestimmten Drahtrichtung ist um eine halbe Driftzellenbreite zu der ersten verschoben. Der Grund hierfür ist, daß in einer Driftzelle nicht festgestellt werden kann, ob das detektierte Teilchen rechts oder links am Signaldraht vorbeigeflogen ist. Falls zwei aufeinanderfolgende Zellen um eine halbe Breite verschoben sind, kann in den meisten Fällen diese rechts/links Unsicherheit ausgeschlossen werden.

Zwischen zwei Drahtebenen ist jeweils ein Folienrahmen eingebaut, welcher mit einer graphitierten Kaptonfolie bespannt ist, die als Kathode dient. Der Abstand zwischen der Folie und den Drähten beträgt 8 mm, der Abstand zwischen den Drähten 7.5 mm. Dabei wechseln sich Signaldrähte - 25.4 μm dicke, vergoldete Wolfram–Drähte - und Potentialdrähte - 127 μm dicke, vergoldete Kupfer–Beryllium–Drähte - ab. Ihre Position wird durch Paßstifte aus Polyoxymethylen (POM) festgelegt, um welche die Drähte in einem $5°$ Winkel gelegt werden. Somit ergibt sich eine Zellgröße von 15×16 mm^2.

Der Stapel aus 14 Draht- und Folienrahmen wird von zwei Stahlrahmen zusammengehalten, welche auch die mechanische Stabilität der ganzen Kammer gewährleisten. Diese Stahlrahmen sind durch sechs Paßbolzen miteinander verbunden, wobei die Position der Bolzen jeweils vom –Z Stahlrahmen festgelegt ist, der mit Paßbohrungen ausgestattet ist. Im +Z Stahlrahmen, der sich im Experiment auf der vom Target abgewandten Seite der Kammer befindet, werden Paßbuchsen eingeklebt, welche somit an der richtigen Position des Rahmens sitzen (vgl. Abb. 3.2).

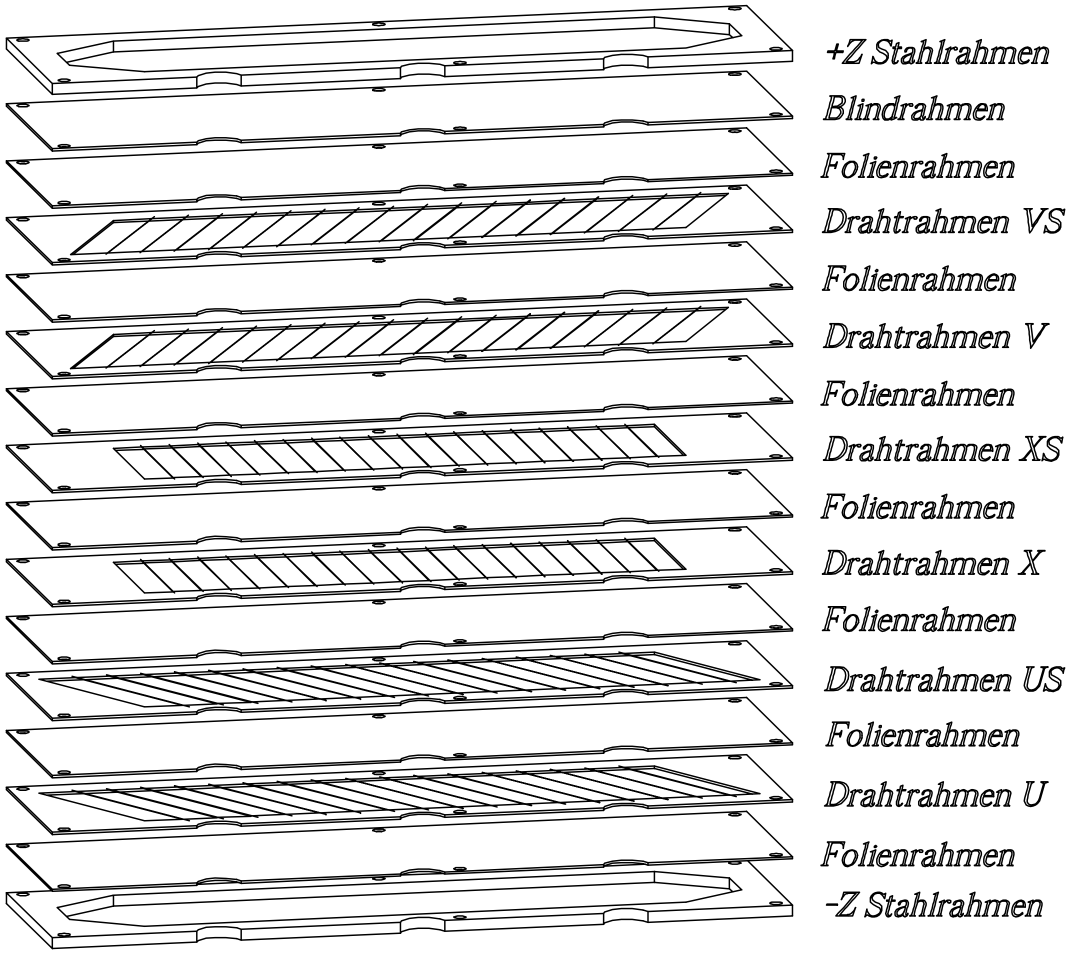

Abb. 3.2: *Schematischer Aufbau der Driftkammern BC1–2.*

Als Driftgas wird die nicht brennbare Gasmischung (Ar : CO_2 : CF_4) in einem Mischungsverhältnis (90 : 5 : 5) verwendet, deren Driftgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Feldstärke in Abbildung 3.3 dargestellt ist ([Mil 93], [Bec 93]).

Dieses Gas zeichnet sich durch seine hohe maximale Driftgeschwindigkeit von 7 cm/μs aus. Im Vergleich dazu haben Standarddriftgase wie zum Beispiel (Ar : CH_4) in einem Mischungsverhältnis (90 : 10) maximale Driftgeschwindigkeiten von typischerweise 5 cm/μs. Aus der Driftgeschwindigkeit des Gasgemisches (Ar : CO_2 : CF_4) ergibt sich eine maximale Driftzeit der Elektronen in einer Driftzelle von 150 ns. Da der zeitliche Abstand zweier Positronenpakete, die im HERA–Speicherring kreisen, 96 ns beträgt, können folglich maximal die Ereignisse zweier Pakete überlappen, wodurch die spätere Auswertung vereinfacht wird.

Von diesen Kammern mit sechs Drahtebenen sind zwei dicht hintereinander im Experiment eingebaut, so daß zwölf Drahtebenen hinter dem Magneten und zwölf Drahtebenen zwischen Čerenkovzähler und Hodoskop 1 zur Verfügung stehen. Eigentlich würden sechs

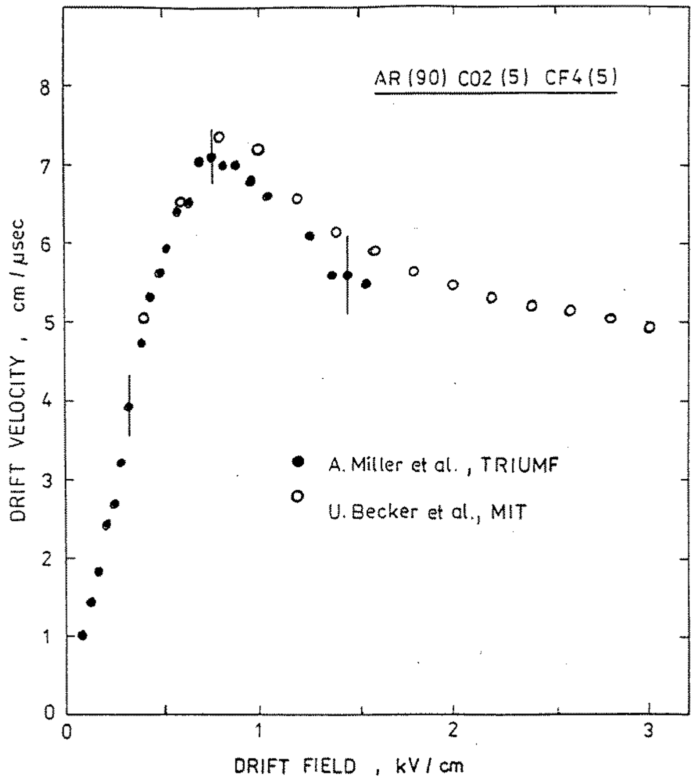

Abb. 3.3: *Driftgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Feldstärke.*

Drahtebenen ausreichen, um die Spur eines Teilchens bestimmen zu können. Da aber die Effizienz der Kammern nicht 100% beträgt und trotzdem gewährleistet sein soll, daß jede Teilchenkoordinate eindeutig bestimmt werden kann, wird ein gewisses Maß an redundanter Information bevorzugt. Ausserdem ist die Ortsungenauigkeit der Messung aufgrund der größeren Statistik kleiner.

Diese zwölf Drahtebenen werden auf zwei Pakete aufgeteilt, um bei einem möglichen Ausfall einer Kammer den Verlust der gesamten Ortsinformation zu verhindern, da in diesem Fall immer noch sechs Drahtebenen zur Messung zur Verfügung stehen.

3.3 Funktionsweise der Driftkammern

Wenn ein geladenes Teilchen durch eine Driftkammer fliegt, dann deponiert es eine gewisse Menge an Energie in dem Driftkammergas und regt die Gasatome an oder ionisiert diese. Dieser Prozess kann mit der Bethe-Bloch-Formel [Bet 30] beschrieben werden:

$$\frac{dE}{dx} = 4\pi\rho N_0 \, \frac{Z}{A} \, \frac{e^4}{m_e c^2 \beta^2} \, z^2 \left(ln \frac{2 m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{I} - \beta^2 \right) \tag{3.1}$$

Dabei ist ρ die Gasdichte, N_0 die Avogadrokonstante, Z die Ladung der Gasatome, A deren Massenzahl, e die Elementarladung, $m_e c^2$ die Ruheenergie des Elektrons, β = v/c,

$\gamma^2 = 1/(1\text{-}\beta^2)$, wobei v die Geschwindigkeit des geladenen Teilchens und c die Lichtgeschwindigkeit darstellt. Z ist die Ladung des ionisierenden Teilchens und I das effektive Ionisationspotential des Gases.

Aus dieser Formel erkennt man, daß der Energieverlust eines geladenen Teilchens nicht von dessen Masse abhängt, sondern lediglich von seiner Geschwindigkeit. Bei niedrigen Geschwindigkeiten fällt der Energieverlust mit $1/\beta^2$ ab, durchläuft dann bei ca. $\gamma\beta = 4$ ein Minimum und steigt bei relativistischen Teilchen aufgrund des logarithmischen Terms wieder an (vgl. Abb. 3.4).

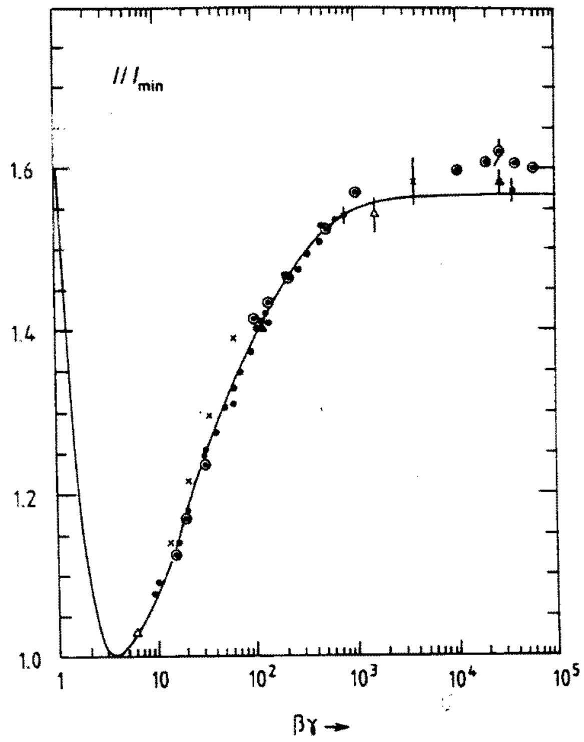

Abb. 3.4: *Normierter mittlerer Energieverlust nach Bethe–Bloch in Argon* [Blu 93].

Die durch Ionisation erzeugten primären Ladungsträger werden in der Driftkammer zur Ortsbestimmung der Teilchenspur verwendet. Die positiv geladenen Atomrümpfe werden auf die Potentialdrähte oder die Potentialfolien beschleunigt, und die Elektronen bewegen sich auf die Signaldrähte zu. In Driftkammern, in denen ein möglichst homogenes Feld zwischen Potentialdraht und Signaldraht angestrebt wird, bewegen sich die Elektronen annähernd mit einer konstanten Driftgeschwindigkeit. Diese kann nach Townsend [Tow 47] mit

$$v_D = \frac{e}{2m_e} E\tau \tag{3.2}$$

berechnet werden. Dabei ist e die Ladung und m_e die Masse des Elektrons. E ist der Betrag der elektrischen Feldstärke und τ die mittlere Zeit zwischen zwei Stößen des Elektrons mit den Gasatomen. Dabei ist zu beachten, daß diese Zeit von der Gassorte, dem

Druck, der Feldstärke und der Energie des Elektrons abhängig ist.

In der Nähe der dünnen Signaldrähte steigt die Feldstärke so weit an, daß der Energiegewinn innerhalb der freien Weglänge größer als die Ionisationsenergie wird und es zur Sekundärionisation und zur Ausbildung einer Ladungslawine kommt. Aus der Zeitdifferenz zwischen Teilchendurchgang und Ankunft der Ladungslawine am Signaldraht erhält man die Driftstrecke der Elektronen:

$$z = \int_{t_0}^{t} v_D(t')\, dt' \tag{3.3}$$

Im Idealfall eines homogenen Felds mit einer konstanten Driftgeschwindigkeit ist der zurückgelegte Ort nach der Beziehung

$$z = v_D(t - t_0) \tag{3.4}$$

proportional zur Driftgeschwindigkeit.

Da die Feldstärke zwischen Signal- und Potentialdraht variiert (vgl. Abb. 3.5) und sich die Driftgeschwindigkeit mit der Feldstärke ändert (vgl. Abb. 3.3), erhält man in der Regel keine lineare Orts–Driftzeit–Beziehung. Deshalb ist es notwendig, den genauen funktionalen Zusammenhang zu kennen, um dann im Experiment mit Hilfe dieser Orts–Driftzeit–Beziehung aus der gemessenen Zeit den genauen Ort berechnen zu können. Für die hinteren Driftkammern BC1–4 wurde diese Beziehung in einem Testrun am DESY gemessen (vgl. Abb. 3.6).

Die Orts–Driftzeit–Beziehung weist in weiten Bereichen ein annähernd lineares Verhalten auf, weicht aber speziell im Bereich des Potentialdrahts stark davon ab. Aus dieser Orts–Driftzeit–Beziehung kann man die Ortsauflösung der Kammer berechnen. Diese liegt in einer für Driftkammern typischen Größenordnung von 200μm.

Voraussetzung für die Messung der Teilchenspur mit einer Genauigkeit von 200 μm auf der aktiven Fläche von 2880 x 710 mm^2 der HERMES–Driftkammern BC3/4 ist es, die Position der Signaldrähte mit größerer Genauigkeit zu kennen. Aufgrund der maschinenbedingten Fertigungstoleranzen bei derartigen Bearbeitungsgrößen, wird jedoch eine Ungenauigkeit in der Position der Paßbohrungen, welche die Drahtposition vorgeben, verursacht. Um systematische Meßfehler durch Fehlpositionen auszuschließen, bzw. zu korrigieren, muß folglich die absolute Position der Signaldrähte exakt vermessen werden. Hierzu wurde das in Kapitel 5 näher beschriebene Drahtvermessungssystem im Rahmen dieser Arbeit aufgebaut.

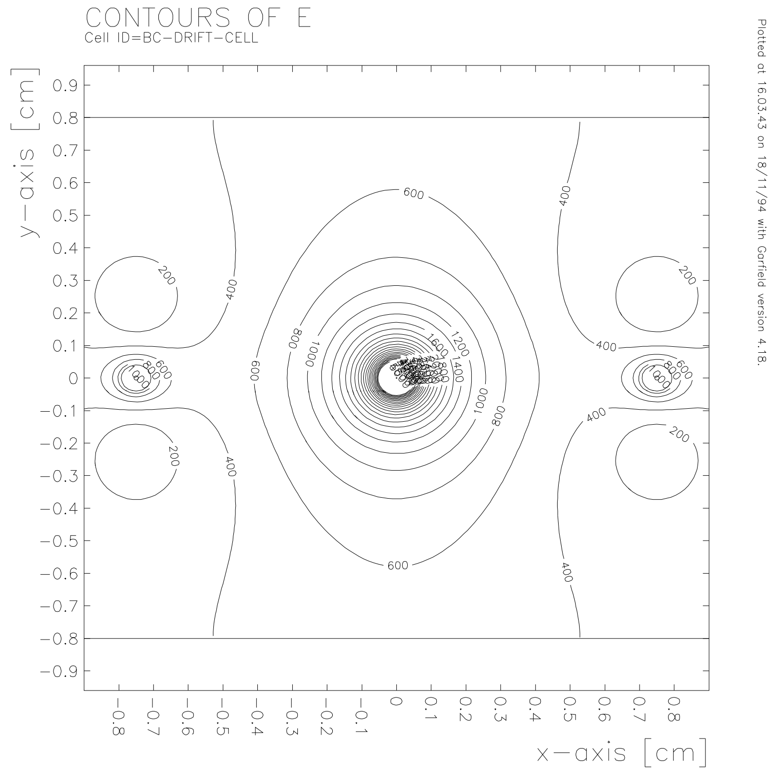

Abb. 3.5: *Mit dem Simulationsprogramm GARFIELD berechnete Feldkonfiguration in der Driftzelle. Der Signaldraht liegt bei x = 0 cm die Potentialdrähte bei $x = \pm$ 0.75 cm.*

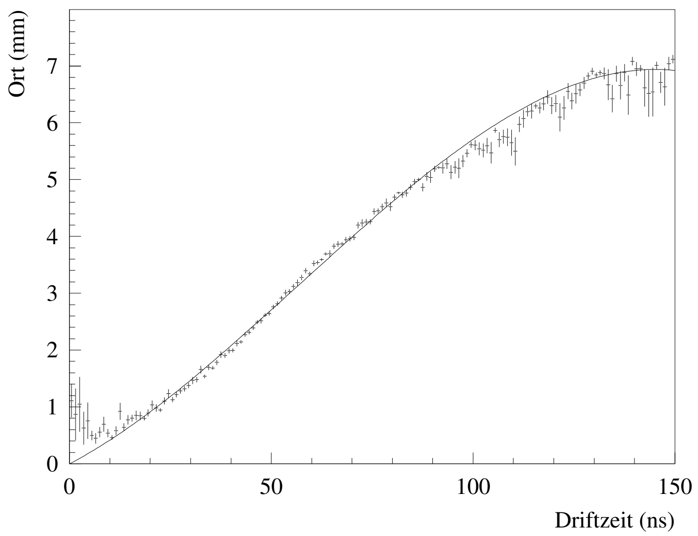

Abb. 3.6: *Bei einer Testmessung mit der Driftkammer BC3 gemessene Orts–Driftzeit–Beziehung. Der Signaldraht liegt bei y = 0 mm, der Potentialdraht bei y = 7.5 mm.*

3.4 Berechnung der Auflösung einer gesamten Kammer

Wie in Kapitel 3.2 beschrieben, ist jede der HERMES–Driftkammern BC1–4 aus 6 Drahtebenen aufgebaut. In dem im letzten Kapitel erwähnten Testrun wurde die Ortsauflösung einzelner Drahtebenen gemessen (vgl. Kap. 5.2). Für die notwendige Genauigkeit der Positionierung der Driftkammern ist es von Interesse, welche Ortsauflösung ein gesamtes Modul besitzt. Es stellt sich nämlich die Frage, wie groß die Fehlpositionierung sein darf, ohne daß der dadurch verursachte systematische Fehler der Ortsbestimmung zu groß wird.

Wie in Kapitel 3.2 erläutert wurde, sind im HERMES–Experiment die X–Drähte der Driftkammern senkrecht gespannt, die U/V–Drähte um $\pm 30°$ geneigt (vgl. Abb. 3.7).

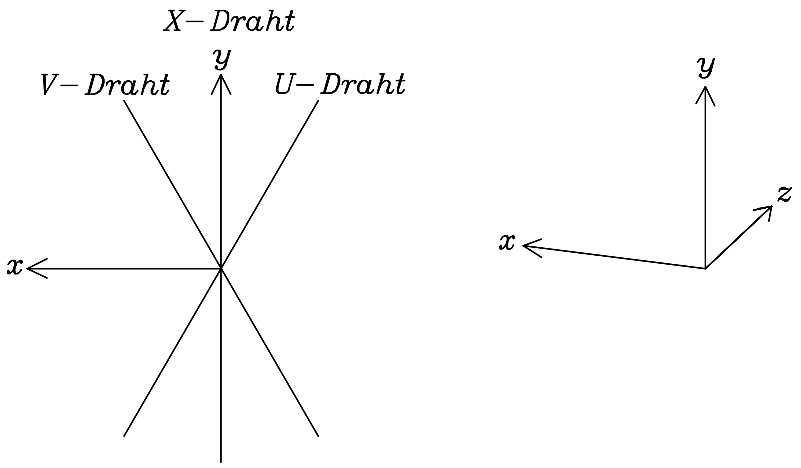

Abb. 3.7: *Darstellung der Drahtrichtungen der HERMES–Driftkammern (links) und des HERMES–Koordinatensystems (rechts).*

Um aus den U– und V–Ebenen die (x,y)–Position zu erhalten, müssen immer mindestens zwei Ebenen gleichzeitig betrachtet werden. Die (u,v)–Koordinaten, die gemessen werden, sind senkrechte Projektionen auf die U/V–Drähte, da die primär erzeugten Elektronen in Drahtkammern senkrecht auf die Drähte zudriften.

Rechnet man in diesem System die Koordinaten eines mit U– und V–Drähten gemessenen Punkts (u,v) in das (x,y)–Koordinatensystem um, so erhält man folgende Beziehungen:

$$x = \frac{1}{\sqrt{3}}(u+v) \tag{3.5}$$

$$y = u - v \tag{3.6}$$

Unter der Annahme, daß die (u,v)–Koordinaten mit einer Auflösung $\sigma_u = \sigma_v = 200\mu$m gemessen werden, kann man daraus mit Fehlerfortpflanzung die Genauigkeit der Messung in x und y berechnen:

$$\sigma_{x_{uv}} = \sqrt{(\frac{\partial x}{\partial u}\sigma_u)^2 + (\frac{\partial x}{\partial v}\sigma_v)^2} = 163\,\mu m \tag{3.7}$$

$$\sigma_{y_{uv}} = \sqrt{(\frac{\partial y}{\partial u}\sigma_u)^2 + (\frac{\partial y}{\partial v}\sigma_v)^2} = 282\,\mu m \tag{3.8}$$

Die Gesamtauflösung der Kammer kann als gewichteter mittlerer Fehler aus den beiden UV–Paaren und den beiden X–Ebenen, die eine Auflösung von $\sigma_{x_x} = 200\mu$m besitzen, angegeben werden [Leo 94]:

$$\sigma_{x_{gesamt}} = \left(\sum_i \frac{1}{\sigma^2_{x_i}}\right)^{-\frac{1}{2}} = 89\ \mu\text{m} \tag{3.9}$$

$$\sigma_{y_{gesamt}} = \left(\sum_i \frac{1}{\sigma^2_{y_i}}\right)^{-\frac{1}{2}} = 199\ \mu\text{m} \tag{3.10}$$

Aus dieser Rechnung kann man die Größenordnung der notwendigen Positioniergenauigkeit erkennen. In der x-Richtung sollte genauer als 0.1 mm vermessen werde, da sonst der systematische Fehler der Vermessung in der Größenordnung des statistischen Meßfehlers läge.

4 Positionsvermessung

4.1 Verschiedene Methoden der Detektorvermessung

Wie im letzten Kapitel erläutert wurde, ist es bei jedem Experiment, bei dem eine Ortsbestimmung durchgeführt wird, notwendig, die genaue absolute Position der einzelnen Detektorkomponenten zu kennen, um durch Fehlpositionierung verursachte systematische Fehler zu vermeiden. Bei HERMES ist es außerdem erforderlich, eine Vermessung des Detektors relativ zu dem Wechselwirkungspunkt durchzuführen. Im folgenden werden hierfür drei verschiedene Methoden näher vorgestellt.

4.1.1 Optische Vermessung

Die optische Vermessung beruht auf dem Prinzip der Triangulation. Dazu werden an den Detektorkomponenten und an festen Orten im HERA–Tunnel Meßmarken befestigt. Bei der Montage von drei Marken an einer Kammer ist es möglich, die Position dieses Moduls relativ zu den anderen Meßmarken zu bestimmen. Dazu werden von drei verschiedenen Positionen im Raum alle Marken angepeilt und die Winkel gemessen. Mit Hilfe dieser Information kann man auf die Positionen zurückrechnen, woraus man die relativen Positionen der Detektorkomponenten untereinander erhält. Mittels der Meßmarken, die fest im HERA Tunnel befestigt sind, erreicht man eine absolute Messung der Detektorposition in dem Koordinatensystem des Beschleunigers.

Der Nachteil dieser Methode ist, daß die zu erreichende Genauigkeit in der Größenordnung von 300 μm liegt. Als absolute Positioniergenauigkeit ist dies jedoch für die Anforderungen des HERMES–Experiments nicht ausreichend (vgl. Kap. 3.4). Folglich ist es nicht möglich, nur diese Methode anzuwenden. Sie ist aber im Rahmen einer ersten Ausrichtung der Detektorkomponenten notwendig und wird im Januar 1995, nachdem der HERMES–Detektor vollständig aufgebaut wurde, durchgeführt.

4.1.2 Spurverfolgung

Eine exakte Methode, um die Position der ortsbestimmenden Detektoren zu vermessen, ist die Spurverfolgung. Dazu wird ohne Magnet gemessen, um gerade Teilchenspuren vom Target durch das gesamte Spektrometer zu erhalten. Aus der Position der Ereignisse in den einzelnen Detektoren kann man dann auf eventuelle Verschiebungen der Detektorkomponenten untereinander zurückrechnen. Weiterhin ist es möglich, Fehlpositionierungen von einzelnen Driftkammerdrähten zu erkennen, die als Fehler in die Ortsbestimmung mit eingehen würden.

Der Nachteil der Spurverfolgung ist jedoch, daß diese Methode sehr aufwendig ist. So müßte beim HERMES–Experiment zu jeder Detektorvermessung der Magnet abgeschaltet und unter Umständen das interne Gastarget umgestellt werden. Dies würde viel Zeit in Anspruch nehmen und es wäre somit unmöglich, eventuelle zeitliche Veränderungen, wie Temperaturausdehnung oder ein Absenken der Plattform, permanent zu beobachten. Temperaturänderungen um wenige Grad würden bereits einen erheblichen Meßfehler verursachen, da zum Beispiel die Drahtrahmen der BC–Driftkammern einen Wärmeausdehnungskoeffizienten von $13.5 \cdot 10^{-6}$ 1/K aufweisen. Daraus ergibt sich bei einem Temperaturanstieg von 5°C eine Längenausdehnung der knapp 4 m langen BC3/4–Module um ca. 260 μm, die nicht mehr ohne Korrektur in Kauf genommen werden kann.

Die Methode der Spurverfolgung sollte eingeplant werden, aber aus oben genanntem Grund ist eine zusätzliche Meßmethode erforderlich, die jederzeit parallel zur Datennahme durchgeführt werden kann.

4.1.3 Laser–Vermessung

Bei dieser Methode werden Laserstrahlen durch den gesamten Detektor geschickt, und die Position einer jeden Komponente wird mittels Sensoren oder Linsen bzw. Blenden bestimmt. Als Sensoren kann man transparente Silizium–Streifen–Detektoren verwenden, mit denen die Position direkt festgestellt werden werden kann. Der Vorteil von diesen Silizium–Streifen–Detektoren ist, daß mehrere gleichzeitig von einem Laser durchstrahlt und somit bis zu 20 Detektorkomponenten in einer Messung erfaßt werden können. Bildet man dagegen den Laserstrahl mit Hilfe von Linsen bzw. Blenden auf eine Kamera ab, muß man entweder für jeden Meßpunkt einen eigenen Laserstrahl vorsehen, oder die Linsen bzw. Blende beweglich montieren, so daß die einzelnen Meßpunkte nacheinander angepeilt werden können.

Diese Laser–Methode zeichnet sich durch ihre große Genauigkeit aus, wie Messungen der ATLAS–Kollaboration zeigen [Kro 94], bei denen mit Silizium–Streifen–Detektoren, die aus amorphen Silizium hergestellt sind, Ortsauflösungen in zwei Koordinaten in der Größenordnung von 1 μm, erzielt wurden.

Darüber hinaus kann sie, im Gegensatz zur Spurverfolgung, parallel zur Datennahme durchgeführt werden. Deshalb wird im HERMES–Experiment diese Methode verwendet. Dies erfordert jedoch die Kenntnis der relativen Position der Drähte zu den äußeren Meßmarken, welche mit Hilfe des Drahtvermessungssystems (vgl. Kap. 5) bestimmt werden kann.

4.2 Das Laser–Vermessungssystem des HERMES–Detektors

Dieses System wird momentan von einer japanischen Gruppe des „Tokyo Institute of Technology“ aufgebaut. Dazu wurden im Rahmen dieser Diplomarbeit einige Vorarbeiten durchgeführt. Die Grundidee des Systems besteht darin, zwei Laserstrahlen parallel zum Positronenstrahlrohr durch den gesamten HERMES–Detektor zu schicken. An den Detektorkomponenten, deren Position bestimmt werden soll, werden je zwei Module befestigt, ausgestattet mit jeweils einem schwenkbaren Arm, in dem eine Fresnel–Zonenplatte eingebaut ist. Diese können in beliebiger Reihenfolge in den Laserstrahl geklappt werden.

Als Fresnel–Zonenplatten wählt man dünne Metallplättchen, die ein rechteckiges Gitter eingestanzt haben (vgl. Abb. 4.1).

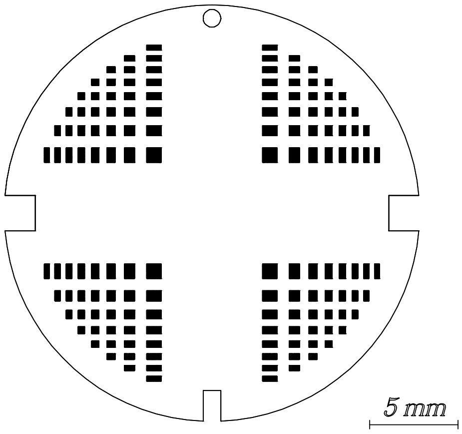

Abb. 4.1: *Aufbau der Zonenplatte für die BC1–Kammern. Die Aussparungen am Rand der Zonenplatte sind zur exakten Positionierung erforderlich.*

Dieses Gitter ist so angelegt, daß es nur die Wellen derjenigen Zonen hindurchläßt, die in dem Brennpunkt der Zone mit gleicher Phase wirken. Damit erreicht man eine Fokussierung auf ein rechteckiges Bild. Der Vorteil dieser Zonenplatte gegenüber Linsen ist, daß die Brennweite durch Variation des Gitterabstands sehr einfach variiert werden kann, wodurch die Montage an verschiedenen Orten im Detektor ermöglicht wird. Im Fokuspunkt der Zonenplatte, der außerhalb des Detektors liegt, wird eine CCD–Kamera montiert, die als ortsbestimmende Komponente dient. Mit dieser CCD–Kamera wird aus dem Bild einer jeden Zonenplatte die Position der Meßmarken jeder Detektorkomponente bestimmt. Daraus berechnet man die relativen Abweichungen der einzelnen Komponenten untereinander. Aus der Position von Meßmarken, die außerhalb der Plattform angebracht werden, wird die Position des Detektors in Bezug auf das Koordinatensystem des Beschleunigers bestimmt.

Als problematisch erwies sich die Entwicklung einer mechanischen Halterung der Zonenplatte, die ihre reproduzierbare Positionierung erlaubt. Dazu wurde ein Schwenkmechanismus gewählt, der von einem um 45° rotierenden elektrisch betriebenen Motor, mit einer nachgeschalteten Übersetzung von 2 : 1, in den Laserstrahl eingeschwenkt werden kann. Beim Abschalten des Motors klappt der Schwenkarm automatisch wieder in seine, durch eingebaute Federn festgelegte, Ruheposition zurück (vgl. Abb. 4.2).

Die Endposition der Bewegung des Schwenkarms ist durch einen Anschlag vorgegeben. Damit wird erreicht, daß die Mittelpunktposition der Zonenplatte sehr genau definiert ist, da auch eine Winkelunsicherheit von 1° eine Fehlpositionierung von nur 3 μm in der x–Richtung und keine Fehlpositionierung in der y–Richtung verursacht. In dieser Betrachtung wurde das HERMES–Koordinatensystem verwendet, das in Abbildung 3.7 dargestellt ist. Außerdem geht in diese Berechnung ein Abstand von 20 mm von dem Mittelpunkt der Zonenplatte zur Rotationsachse ein. Die Winkelverkippung und die Fehlpositionierung in der z–Richtung können vernachlässigt werden.

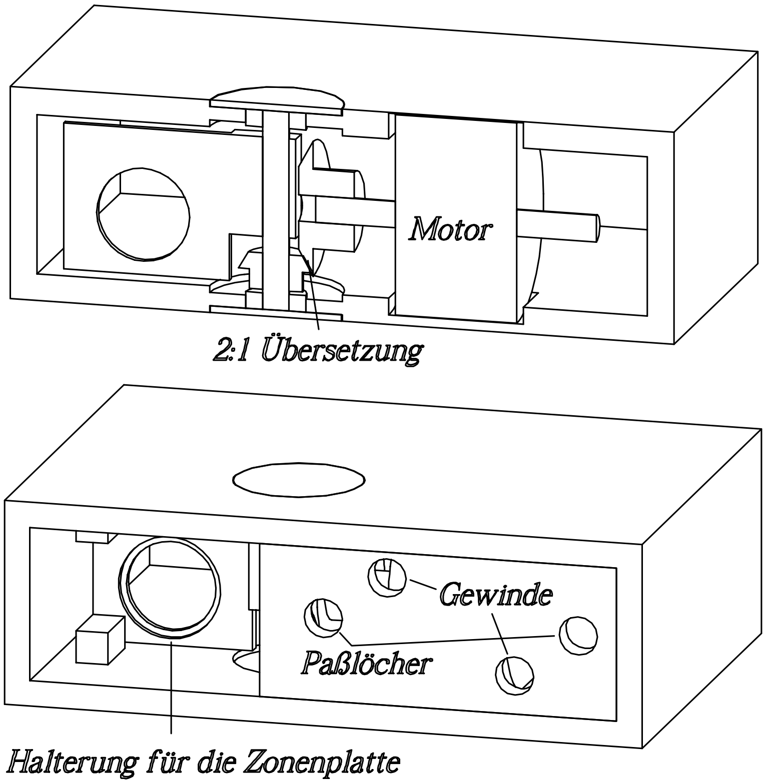

Abb. 4.2: *Aufbau der Laser–Vermeßmarken. Im oberen Teil ist ein Schnitt durch die Rotationsachse der Aufhängung der Zonenplatte dargestellt. Im unteren erkennt man die Montagevorrichtung, mit deren Hilfe das Modul an Befestigungsplatten an der Kammer angebracht wird.*

Da die Driftkammern BC1/2 und FC1/2 sehr nahe am Magneten eingebaut werden, ist in ihrem Bereich das magnetische Streufeld sehr groß (≈ 0.1 T). Aus diesem Grund ist es an diesen Stellen nicht möglich, eine Meßmarke mit einem Elektromotor zu betreiben. Deshalb wurde für diese Driftkammern ein weiteres Modul entwickelt, das mit Preßluft angetrieben wird.

Für dieses Laser–Vermessungssystem war es notwendig, einen Kanal mit 30 mm Durchmesser durch den gesamten Detektor freizuhalten. Im Magneten und an den vorderen Driftkammern FC1/2 hingegen war dieser Weg versperrt. Hierzu wurde durch die Septumplatte des Magneten ein 50 x 30 mm^2 großes Loch gebohrt und in den Rahmen der Driftkammern FC1/2 Aussparungen vorgesehen.

5 Der Aufbau des Drahtvermessungssystems

5.1 Motivation für den Bau des Drahtvermessungssystems

Um die genauen absoluten Drahtpositionen der Driftkammern BC1–4 im Experiment bestimmen zu können, ist es notwendig, diese vor dem Zusammenbau der Kammern relativ zu im Experiment verwendeten Referenzmarken zu vermessen. Dies beinhaltet sowohl die Laser–Vermeßmarken, mit deren Hilfe der Detektor während der Datennahme auf Ortsveränderungen hin überwacht wird, als auch die optischen Vermeßmarken, die für eine erste Ausrichtung des HERMES–Experiments benötigt werden. Deshalb war es erforderlich, eine Apparatur zu entwickeln, die in der Lage ist, die Drahtpositionen relativ zu an der Außenseite des Stahlrahmens befestigten Marken genauer als 30 μm zu vermessen.

5.2 Methoden der Drahtvermessung

Es existieren verschiedene Methoden, die Position von Drähten zu bestimmen. Bei Drähten die in Driftkammern eingebaut werden, ist darauf zu achten, daß sie keinerlei mechanischer Belastung ausgesetzt werden. Eventuelle Oberflächenbeschädigungen der relativ weichen Goldbeschichtung könnten zu Feldstärkespitzen führen. In Extremfällen kann es zu sogenannter „kalter Entladung“ an der Oberfläche der Potentialdrähte kommen, was bedeutet, daß die Feldstärke groß genug ist, um die Austrittsarbeit der Elektronen zu überwinden, welche dann echte Signale vortäuschen. Aus diesem Grund scheidet eine mechanische Ortsbestimmung mit einem Tastkopf von vornherein aus.

Da bei den BC1–4 die Drahtrahmen einzeln vor der Montage vermessen werden können, stehen verschiedene optische Methoden zur Verfügung. Die einfachste wäre die Verwendung eines optischen Mikroskops. Die große Anzahl von Drähten und die Dimensionen der zu vermessenden Drahtrahmen machen dies allerdings unmöglich. Untersuchungen an dem Institut für Kernphysik der Johannes Gutenberg–Universität in Mainz haben gezeigt, daß ein Aufbau mit einer amplitudenmodulierten Laser–Reflexionslichtschranke die Anforderungen in Genauigkeit und Zuverlässigkeit erfüllt [Mau 93]. Auf diesen Erfahrungen aufbauend, wurde auch für das Drahtvermessungssystem der HERMES–Driftkammern BC1–4 diese Methode gewählt.

Demgegenüber wäre es auch möglich, die Drahtposition nach dem Zusammenbau der Kammern zu bestimmen. Dafür benötigt man Methoden, die in der Lage sind, die Potentialfolien zu „durchleuchten“. Diese Anforderung würden Röntgenstrahlen erfüllen, mit denen man die Drähte in einem Verhältnis 1:1 auf Photoplatten ablichten und diese dann auswerten könnte. Eine weitere Möglichkeit besteht im Aufbau eines dünnen kollimierten Teilchenstrahls einer radioaktiven Quelle, der Spuren in der Kammer erzeugt. Triggert man auf die einzelnen Teilchen und liest mit dieser Zeitinformation die Driftzelle aus, so erhält man, in Abhängigkeit vom Strahlort, unterschiedliche Driftzeiten. Die Position des Signaldrahts liegt an dem Ort, an dem man die minimale Driftzeit mißt [Oh 93]. Nach dem gleichen Prinzip wurde bei einem Testrun mit dem ersten BC3–Modul eine solche Ortsbestimmung durchgeführt. Der Teilchenstrahl bestand hier aus 3 GeV Elektronen, deren genaue Position durch 2 Mikrostreifendetektoren gemessen wurde, die vor und hinter der Driftkammer aufgestellt waren. Die Ortsauflösung dieser Silizium–Streifen–Detektoren betrug 30 μm. Wenn man die Driftzeit über dem Ort der Spur im Koordinatensystem der Mikrostreifendetektoren aufträgt, so erhält man eine Orts–Driftzeit–Beziehung, deren Minimum durch den Ort des Signaldrahts gegeben ist (vgl. Abb. 5.1).

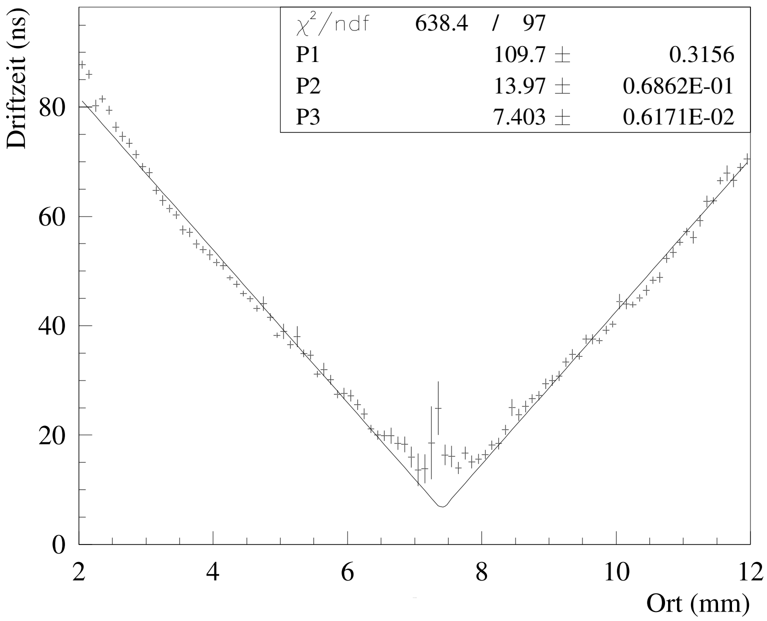

Abb. 5.1: *Ortsbestimmung eines Drahts mit Hilfe von geraden Spuren durch die Kammer.*

Um den Ort des Signaldrahts bestimmen zu können, wurde die Kurve mit zwei in einem Punkt gekoppelten, zur y–Achse spiegelsymmetrischen Geraden angefittet. Der Schnittpunkt entspricht dann exakt der Position des Signaldrahts. Aus den Fitparametern erhält man:

$$\text{Position Signaldraht} = 7.403 \text{ mm} \pm 6.2 \ \mu\text{m} \tag{5.1}$$

Hieraus erkennt man, daß die Position des Signaldrahts mit einer Genauigkeit von 6.2 μm bestimmt wurde. Mit dieser Methode wäre es prinzipiell möglich, die gesamte Kammer zu vermessen. Dies wäre jedoch sehr zeitaufwendig. Wenn man zur Ortsbestimmung die anderen Komponenten des Detektors verwendet, entspricht dies der in Kapitel 4.1.2 erläuterten Spurverfolgung.

Diese Meßmethode hat den großen Vorteil, daß alle Drahtebenen gleichzeitig in der fertig montierten Kammer vermessen werden können. Ungenauigkeiten, die von einer späteren Montage verursacht werden, treten nicht auf. Der Nachteil all dieser Meßmethoden am geschlossenen Modul ist jedoch, daß damit die äußeren Referenzmarken nicht vermessen werden können.

5.3 Der mechanische Aufbau

Da die Module BC1/2 in Erlangen und BC3/4 in Zeuthen gefertigt wurden, war es erforderlich, zwei Vermessungssysteme aufzubauen, die sich aufgrund der unterschiedlichen Abmessungen von BC1/2 ($2604 \times 764 \times 188$ mm^3) und BC3/4 ($3804 \times 1194 \times 188$ mm^3) in ihrer Größe unterscheiden. Außerdem müssen, nach eventuellen Reparaturen an den Kammern, wie zum Beispiel dem Auswechseln von Drähten, die veränderten Drahtrahmen erneut vermessen werden. Aus diesem Grund war es notwendig, das größere Zeuthener Meßsystem zerlegbar zu konstruieren, um es nach dem Zusammenbau der Kammern in Zeuthen an das DESY in Hamburg zu transportieren, so daß dort, während des Experiments notwendige Vermessungen an allen BC–Modulen durchgeführt werden können. Das Zeuthener und das Erlanger System sind analog aufgebaut. Der Einfachheit halber soll im weiteren Verlauf jedoch nur das Erlanger System vorgestellt werden.

5.3.1 Das Erlanger System

Das optische Herzstück der Drahtmeßmaschine ist eine Laser–Reflexionslichtschranke. Sie besteht aus einem Laserdioden–Kollimatorsystem, das sich aus einer Laserdiode und einem Objektiv–Triplett zusammensetzt. Dieses Kollimatorobjektiv richtet die Laserstrahlung parallel aus. Vor dieses ist eine Mikrofokusoptik montiert, die den Laserstrahl in einem Abstand von 80 mm auf einen Strahldurchmesser von 40×120 μm^2 fokussiert. Der Photosensor setzt sich aus einem Phototransistor und einem Vorverstärkermodul zusammen, die gemeinsam in einem Aluminiumzylinder montiert sind. Zur reproduzierbaren Halterung sind Laser und Photosensor in einem PVC–Block (vgl. Abb. 5.2) vor dem zu vermessenden Drahtrahmen montiert. Der PVC–Block ist so gefertigt, daß der Laserstrahl in einem Winkel von 10° auf die Drahtebene trifft und das dort reflektierte Licht ebenfalls unter 10° vom Sensor detektiert wird.

Diese Reflexionslichtschranke sitzt auf dem Schlitten einer Linearführung und kann mit Hilfe eines Schrittmotors über die gesamte Länge der Kammer mit einer Genauigkeit von ± 50 μm positioniert werden. Mit einem fest mit der Lichtschranke verbundenen Metallbandmaßstab wird permanent die Position des Schlittens gemessen, die bei Detektion eines Drahts ausgelesen werden kann. Lineareinheit und Maßstab sind zusammen mit Hilfe von Sockeln (vgl. Abb. 5.3) auf einem überfrästen Doppel–T–Träger (DTT) montiert.

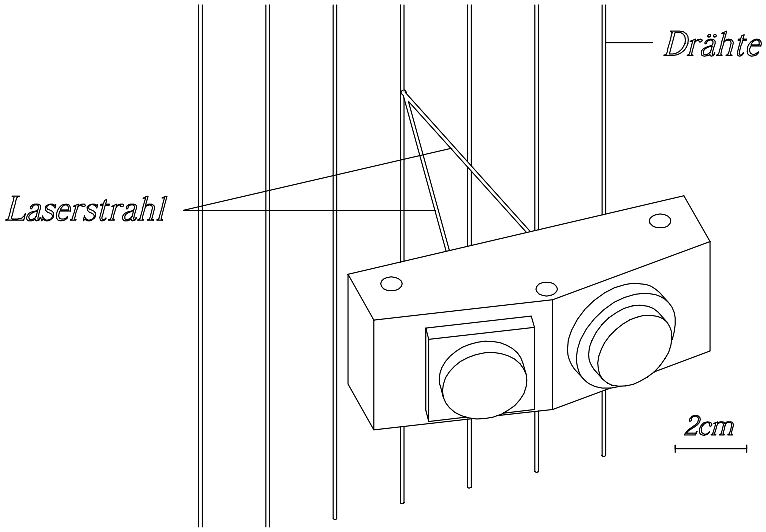

Abb. 5.2: *Dreidimensionale Ansicht des PVC–Blocks. Auf der linken Seite befindet sich der Laser. Der Laserstrahl trifft einen Draht und wird zum Photosensor hin reflektiert, welcher auf der rechten Seite im PVC–Block montiert ist. Der Abstand der Drähte ist in dieser Zeichnung nicht maßstabsgetreu dargestellt.*

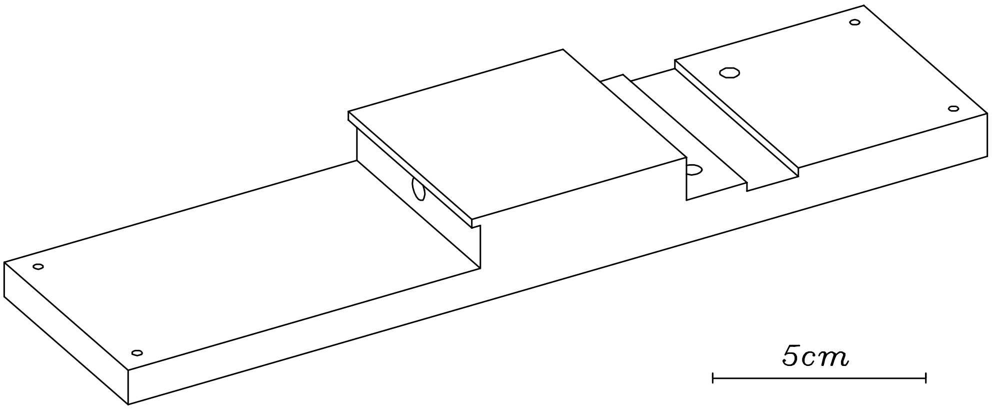

Abb. 5.3: *Aufbau des Montageklotzes, auf dessen linker Seite der Maßstab montiert wird. Auf der rechten Seite, auf der die Lineareinheit befestigt wird, ist am Boden eine Nut zu sehen, die einen freien Lauf des Zahnriemens, der seinerseits den Schlitten antreibt, gewährleistet.*

Die Sockel haben als Auflagepunkte höhenverstellbare Schrauben, damit eventuelle Unebenheiten des DTT ausgeglichen werden können. Weiterhin garantieren die Sockel eine exakte Parallelität von Maßstab und Lineareinheit, die notwendig ist, um die vom Hersteller angegebene Meßgenauigkeit von 5 μm/m zu erzielen. Der DTT ist auf Halterungen aufgelegt, die an zwei Hubspindeln befestigt sind, die ihrerseits synchron über einen Zahnriemen in der Höhe verstellt werden können. Mit diesen Spindeln ist es möglich, die gesamte Verfahreinheit über 984 mm in der Höhe zu verstellen, so daß Messungen ober- und unterhalb des Rahmens erfolgen können. Dies ist erforderlich, um die Laser–Vermeßmarken, die unterhalb der Kammer montiert werden, in die Vermessung mit einbeziehen zu können. Ein Gestell, welches aus U–Profilen und Vierkantrohren zusammengeschweißt ist, bildet den Halterahmen des ganzen Systems (vgl. Abb. 5.4).

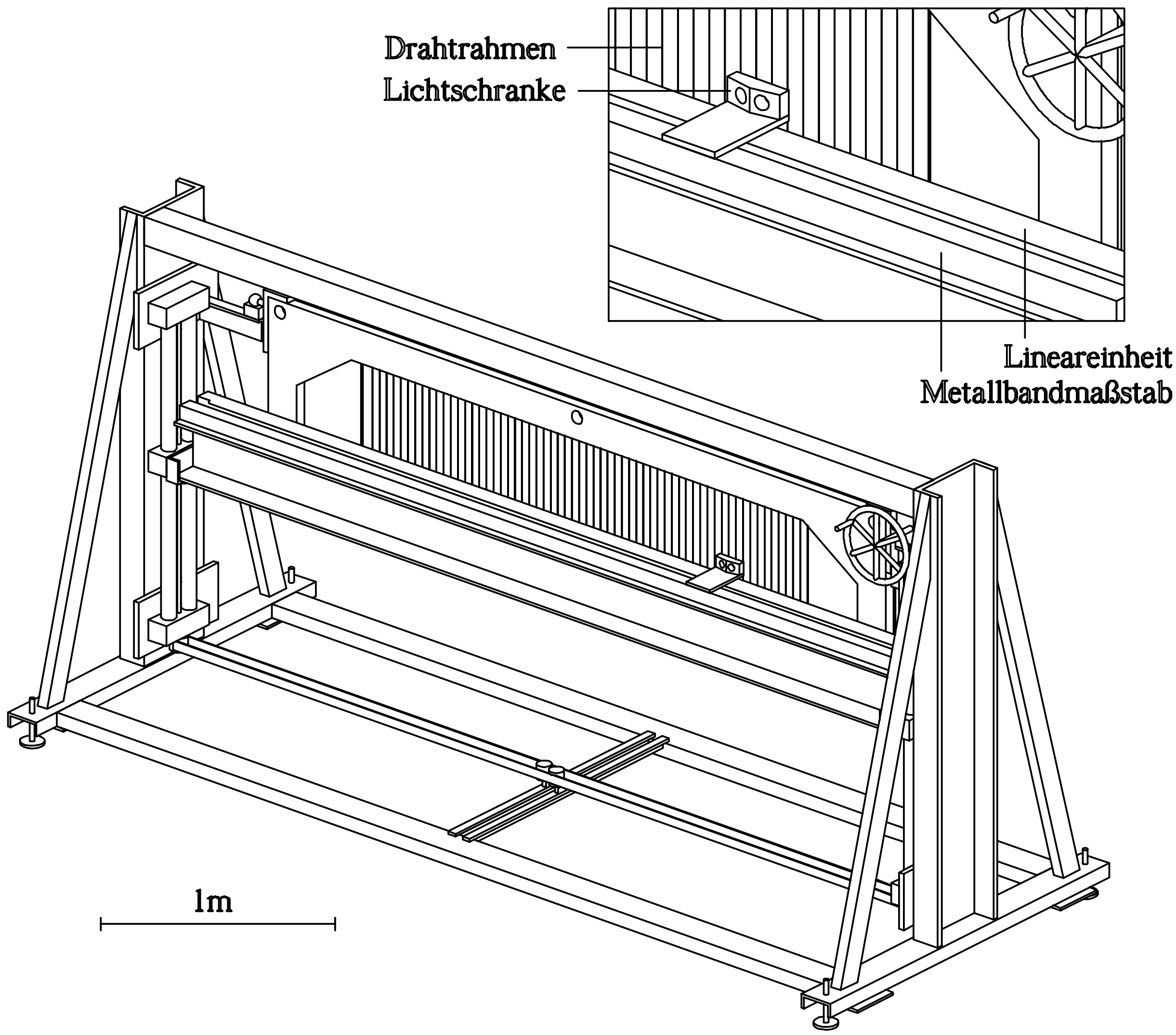

Abb. 5.4: *Gesamtaufbau des Drahtvermessungssystems.*

Bei diesem Rahmen wurde darauf geachtet, daß Eigenschwingungen der Apparatur durch Verstrebungen so weit wie möglich unterdrückt werden. Dies soll verhindern, daß die Messungen durch Erschütterungen beeinflußt werden. Das gesamte Gestell ist auf vier höhenverstellbaren Füßen gelagert, um eine horizontale Ausrichtung zu ermöglichen.

Die Vermessung der Drahtrahmen sollte in einer Position erfolgen, die so weit wie möglich mit der endgültigen Montageposition der Driftkammern im Experiment übereinstimmt. Deshalb werden die Drahtrahmen auf einen Stahlrahmen montiert, welcher seitlich aufgehängt wird. Dafür sind vor den Hubspindeln Halterungen befestigt, in die mit Winkeln an den Stahlrahmen geschraubte Kugeln eingelegt werden. Auf der einen Seite wird die Kugel in eine kegelförmige Mulde eingesetzt, so daß die Position hier festgeschrieben ist. Auf der anderen Seite liegt die Kugel lediglich in einer rautenförmigen Nut, um die Parallelität von Drahtrahmen und DTT zu gewährleisten. Diese Aufhängung garantiert, daß keine Spannungen aufgrund unterschiedlicher Wärmeausdehnungskoeffizienten auftreten können (vgl. Abb. 5.5).

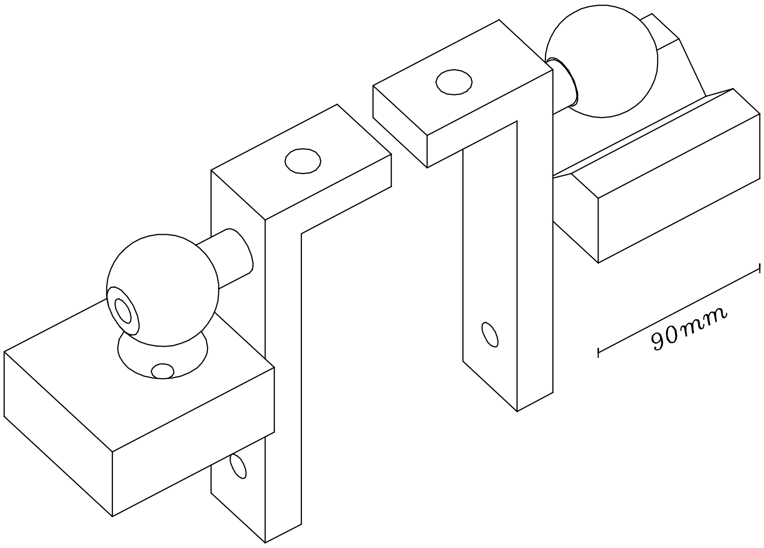

Abb. 5.5: *Schematische Darstellung der Montagewinkel, mit denen die Stahlrahmen in die Meßapparatur eingehängt werden.*

Der Abstand zwischen den Hubspindeln und dem Stahlrahmen wurde so gewählt, daß die Drahtebene 79 mm von der Lichtschranke entfernt ist und somit der Fokus des Lasers exakt in der Drahtebene liegt. Der Laser wird so ausgerichtet, daß die große Achse der Ellipse parallel zu den senkrechten Drähten ist, um ein möglichst kurzes Reflexionssignal zu erzeugen.

5.3.2 Kompensation von Fehlern durch Abstandsänderungen

Der Aufbau der Reflexionslichtschranke mit gleich großem Einfalls– und Detektionswinkel ist notwendig, um U–, X– und V–Rahmen in einer Einstellung vermessen zu können. Aus diesem Grund scheidet ein Einfallswinkel von 0° aus und es wurde der kleinstmögliche Winkel gewählt, mit dem Laser und Photosensor nebeneinander in den PVC–Block eingebaut werden konnten.

Dieser Einfallswinkel von 10° hat jedoch den Nachteil, daß durch eine Abstandsänderung zwischen Laser und Drahtebene Fehlmessungen verursacht werden. Aus Abbildung 5.6 erkennt man, daß die Fehlmessung Δx proportional zu dem Tangens des Einfallswinkels und der Abstandsänderung ist.

$$\Delta x = \Delta d \cdot \tan 10^\circ \tag{5.2}$$

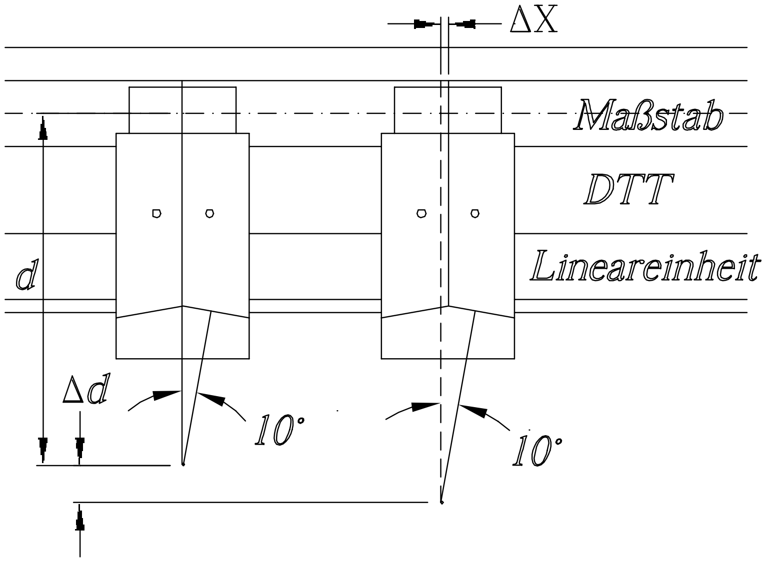

Abb. 5.6: *Schematische Darstellung der Fehlmessung bei einer Änderung des Abstands zwischen Laser und Drahtebene.*

Montiert man die Laser–Lichtschranke jedoch um 180° gedreht, so daß die Plätze von Laser und Photosensor ausgetauscht werden, erhält man bei gleicher Abstandsänderung eine Fehlmessung mit gleichem Betrag, jedoch entgegengesetztem Vorzeichen. Bildet man aus zwei Messungen mit diesen beiden Einstellungen der Lichtschranke, die im Weiteren als P+ und P– bezeichnet werden, den Mittelwert, dann erhält man eine vom Abstand unabhängige Drahtposition.

Dieses Umsetzen des Lasers könnte Fehlpositionierungen bei aufeinanderfolgenden Messungen hervorrufen, falls die Lichtschranke nicht exakt die gleiche Position einnimmt. Um dies zu vermeiden, wird der PVC–Block auf zwei Paßstifte aufgesetzt, welche im Schlitten der Linearführung eingepaßt sind, die eine gute Reproduzierbarkeit der Position ermöglichen. Diese Umsetzgenauigkeit wurde überprüft und wird in Kapitel 6.2.2 ausführlich erläutert.

5.4 Der Aufbau einer Eichplatte

Das bisher beschriebene Vermessungssystem ist lediglich in der Lage, eine eindimensionale Messung durchzuführen. Dies liegt daran, daß nur Abstände zwischen zwei verschiedenen Drähten gemessen werden, aber keine Information darüber erzielt wird, in welcher Höhe oder in welchem absoluten Abstand, die Vermessung zu den äußeren Referenzmarken stattfindet. Aus diesem Grund ist es notwendig, eine Anbindung zu ermöglichen, mit der die momentane Höhe und die Absolutposition, in Bezug auf den oberen mittleren Bolzen der Kammer, bestimmt werden kann. Als Referenz wurde der Mittelpunkt dieses Bolzens gewählt, da er der Ursprung des Kammerkoordinatensystems ist. Für die Anbindung wurde eine 5 mm dicke Edelstahlplatte gefertigt (vgl. Abb. 5.7), die mit einer Paßbuchse auf den oberen Bolzen aufgeschoben wird und mit einem Langloch über dem unteren mittleren Bolzen den richtigen Aufhängungswinkel definiert (vgl. Abb. 6.1).

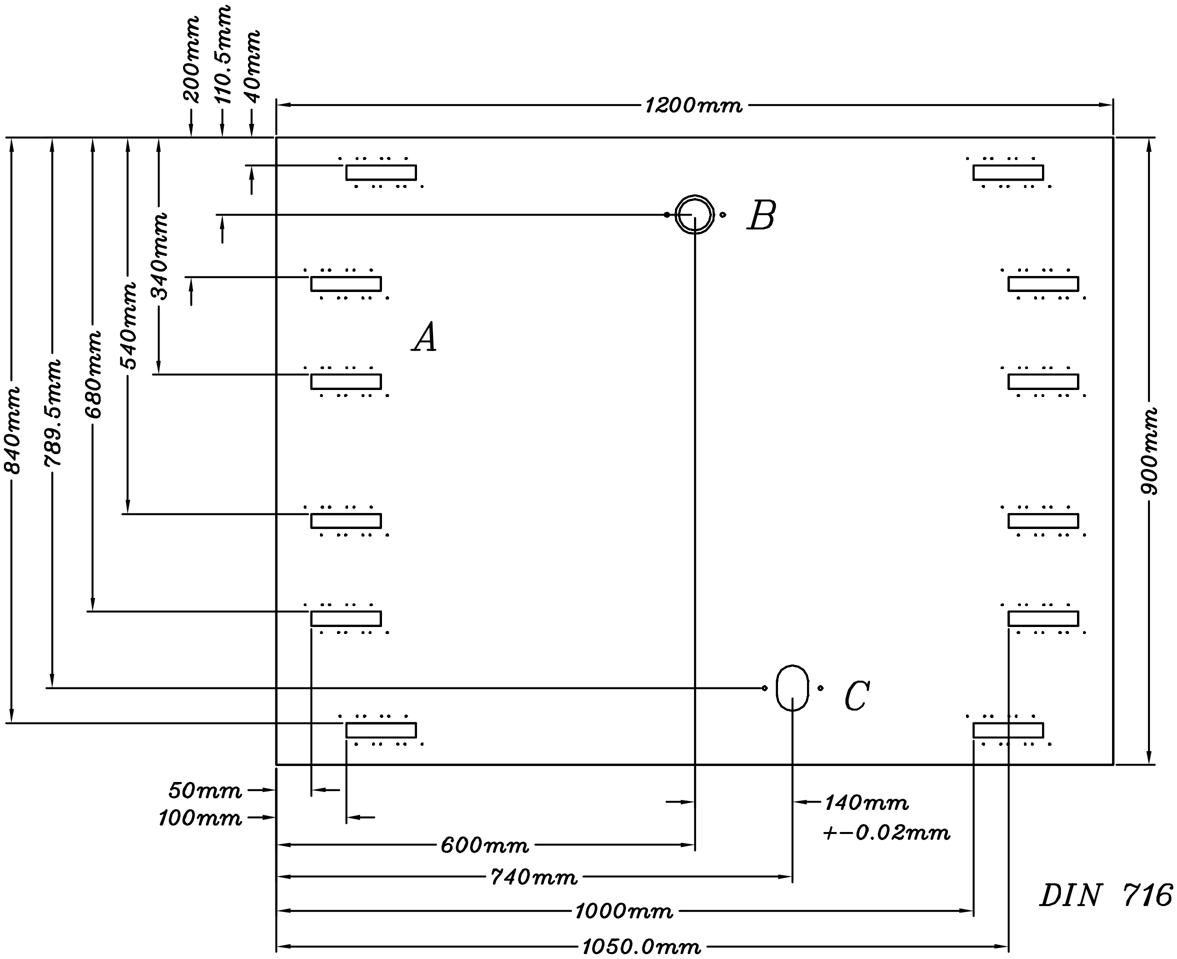

Abb. 5.7: *Schematische Darstellung der Eichplatte, in die Aussparungen gefräst und Paßlöcher gebohrt wurden, welche danach noch sehr exakt auf einer 3D–Meßmaschine „geeicht“ wurden.*

In die Platte sind Aussparungen und Paßlöcher eingearbeitet, wobei in letztere Paßstifte eingesetzt werden. Um jene werden Drähte über die Aussparungen gespannt. Die Positionen der Paßbohrungen sind bekannt, da sie relativ zu der Paßbuchse auf einer 3D–Meßmaschine auf 5 μm/m vermessen wurden. Aus der Position der Bohrungen läßt sich die Position der Drähte berechnen. Auf jedem Fenster der Eichplatte sind drei Drähte gespannt, wobei die beiden äußeren gegenüber dem mittleren um 45° geneigt sind (vgl. Abb. 5.8).

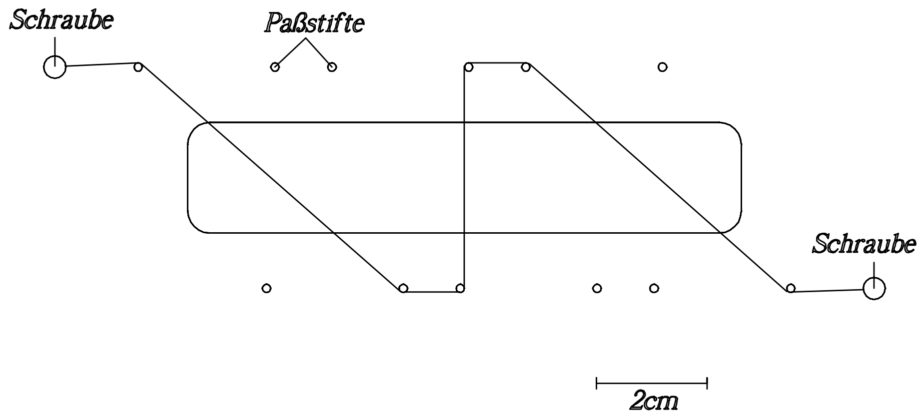

Abb. 5.8: *Veranschaulichung der Position der Drähte auf der Eichplatte.*

Diese können mit dem Meßsystem - genau wie die Drähte in den Drahtrahmen - gemessen werden. Aus der Position des senkrechten Drahts erhält man eine Anbindung zwischen Bolzenposition und der Anzeige des Maßstabes, da der Abstand zwischen Draht und Buchsenmittelpunkt auf der Eichplatte bekannt ist. Aus den Abständen der Drähte untereinander erhält man die Höhe, in der gemessen wurde. Da bei einer Vermessung der Platte zwei Fenster mit dem Laser angepeilt werden, bestimmt man in 1 m Abstand zwei Koordinatenpunkte und kann daraus eine Gerade berechnen, auf welcher der Laserstrahl die Drähte der Kammer abfährt.

5.5 Die Positionsbestimmung der äußeren Meßmarken

Sowohl die optischen Meßmarken als auch die Laser–Vermeßmarken, die zur Vermessung des Detektors dienen, können nicht mit diesem Drahtvermessungssystem erkannt werden, da es lediglich auf die Detektion von Drähten ausgelegt ist. Deshalb ist es notwendig, mit Hilfsmodulen zumindest die Position der Paßbohrungen zu bestimmen, in welchen die Alignmentmarken befestigt werden.

5.5.1 Hilfsmodule des Laser–Vermessungssystems

Zur Befestigung dieses Systems ist in jedem Stahlrahmen eine Aussparung eingearbeitet, in der mit Paßstiften eine Montageplatte reproduzierbar befestigt werden kann. In dieser Montageplatte sind wiederum Paßlöcher vorhanden, womit die Laser–Vermeßmarken verstiftet werden können. Zur Vermessung der Position der Paßlöcher müssen an diesen Montageplatten Hilfsmodule angeschraubt werden, auf denen Drähte gespannt sind, die von dem Drahtvermessungssystem erkannt werden können (vgl. Abb. 5.9). Die Hilfsplatten sind mit einer CNC–Maschine auf 20 μm genau gefertigt, wodurch die Berechnung der Positionen der Paßbohrungen in der Montageplatte aus der Position der Drähte, die ihrerseits um Paßstifte gelegt sind, ermöglicht wird.

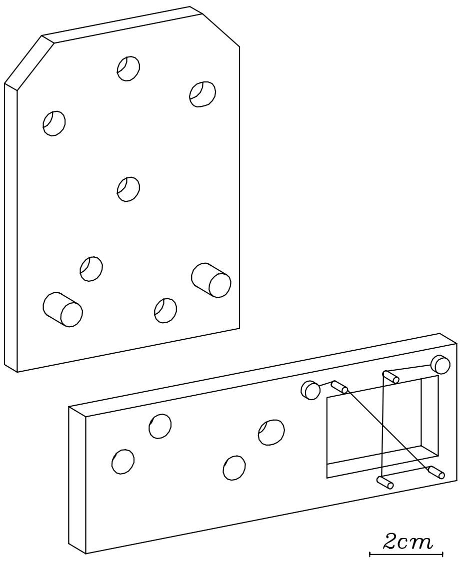

Abb. 5.9: *Schematische Darstellung der Montageplatte (oben) und der für die Vermessung notwendigen Hilfsplatte.*

5.5.2 Hilfsmodule des optischen Vermessungssystems

Die zur optischen Vermessung benötigten Meßmarken werden im –Z–Stahlrahmen an vier Paßbohrungen befestigt, welche an den Seitenflächen des Rahmens vorhanden sind. Um die vom Hersteller der Rahmen angegebenen Koordinaten zu überprüfen, wurden Hilfsmarken gebaut, welche in die Paßbohrungen eingesetzt werden. Auf diesen Hilfsmarken sind zwei Drähte gespannt, die mit dem Meßsystem erkannt werden. Hierbei muß sich die eigentliche Fokusebene 27 mm vor dem Mittelpunkt der Paßbohrung befinden. Ein Modul, welches diese Anforderungen erfüllt, ist in Abbildung 5.10 dargestellt.

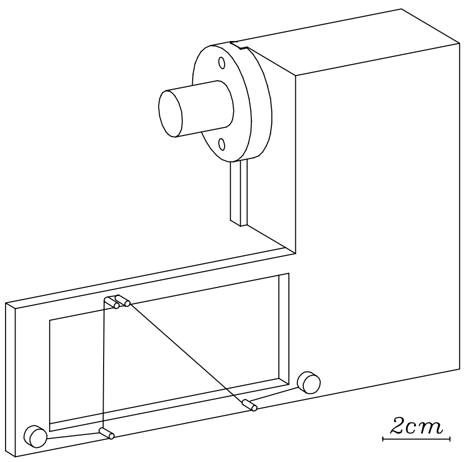

Abb. 5.10: *Schematische Darstellung der Meßmarke, die für die Positionsbestimmung der Paßbohrungen dient, die bei der optischen Vermessung verwendet werden.*

5.6 Die Ausleseelektronik

Um nicht auf Streulichteinfälle empfindlich zu sein, wird der Laser des Lichtschrankenmoduls mit Hilfe eines TTL–Signals, das von dem Referenzfrequenzgeber [Mau 93] erzeugt wird, amplitudenmoduliert. Das an den Drähten reflektierte Lichtsignal wird mit Hilfe des Phototransistors empfangen, anschließend verstärkt und als Eingangssignal an einen Lock–in Verstärker [Mau 93] angelegt. Als Referenz für den Lock–in dient der zweite Ausgang des Referenzfrequenzgebers, der sowohl in der Phasenlage als auch in der Impulsbreite variiert werden kann. Das von dem Lock–in Verstärker erkannte Reflexionssignal, wird in einen „PEAK–Detektor" [Mau 93] eingespeist, der nach dem Prinzip einer „Sample & Hold"–Schaltung [Hor 89] auf das Maximum der Reflexion anspricht. Im Anschluß an den „Peak Detektor" wird noch eine Totzeitschaltung vor die Positionsanzeige des Metallbandmaßstabes eingebaut, die ein TTL–Signal an die VRZ404 Positionsanzeige schickt, wenn ein Draht detektiert wurde. Daraufhin wird der momentan angezeigte Wert in einen Zwischenspeicher übernommen und die VRZ404 Einheit gibt nach einer Verzögerungszeit von 0.8 μs den Steuerbefehl „Service Request" an einen CAMAC GPIB Controller ab, der nach diesem Signal mit der Auslese beginnt.

Darüber hinaus hat die Totzeitschaltung [Mau 93] die Aufgabe für eine bestimmte Zeit kein weiteres Signal passieren zu lassen. Dies muß so lange gewährleistet sein, wie das Datennahmesystem benötigt, das VRZ404 Modul auszulesen. Würde währenddessen ein weiterer Einspeicherbefehl erfolgen, so würde die Positionsanzeige in einen Fehlerstatus übergehen und die Messung müßte abgebrochen werden.

5.7 Das Datennahmesystem

Das Erlanger Datennahmesystem ist in Anlehnung an das beim HERMES–Experiment verwendete System aufgebaut, um optimale Kompatibilität zu gewährleisten.

Der Hostrechner der Datennahme ist eine DEC Station 5000/240, die mit zwei SCSI (Small Computer System Interface) Hostadaptern ausgerüstet ist. Am ersten sind Festplatten und Exabyte Laufwerke angeschlossen. Der zweite bildet über ein FASTBUS–SCSI–Interface die Verbindung zwischen dem FASTBUS–Master, einem CHI (CERN Host Interface), und der DEC Station.

FASTBUS [FAS 86] ist ein BUS Standard, der unter anderem durch eine große Datenübertragungsrate von bis zu $40 Mbyte/s$ ausgezeichnet ist.

In der momentanen Konfiguration wird die Auslese von FASTBUS, CAMAC [CAM 72] und VME [VME 87] unterstützt. Die Auslese von VME erfolgt über ein FASTBUS–nach–VSB–Interface. Die von CAMAC geschieht FASTBUS–seitig über einen CAMAC–Branch–Driver und CAMAC–seitig über einen CAMAC–Crate–Controller.

Die verwendete Schrittmotorsteuerung ist ein CAMAC Einschub und kann mit den üblichen CAMAC Befehlen programmiert werden. Die Auslese der Metallbandmaßstabelektronik erfolgt über ein CAMAC–GPIB–Interface. GPIB ist ein sehr häufig verwendeter

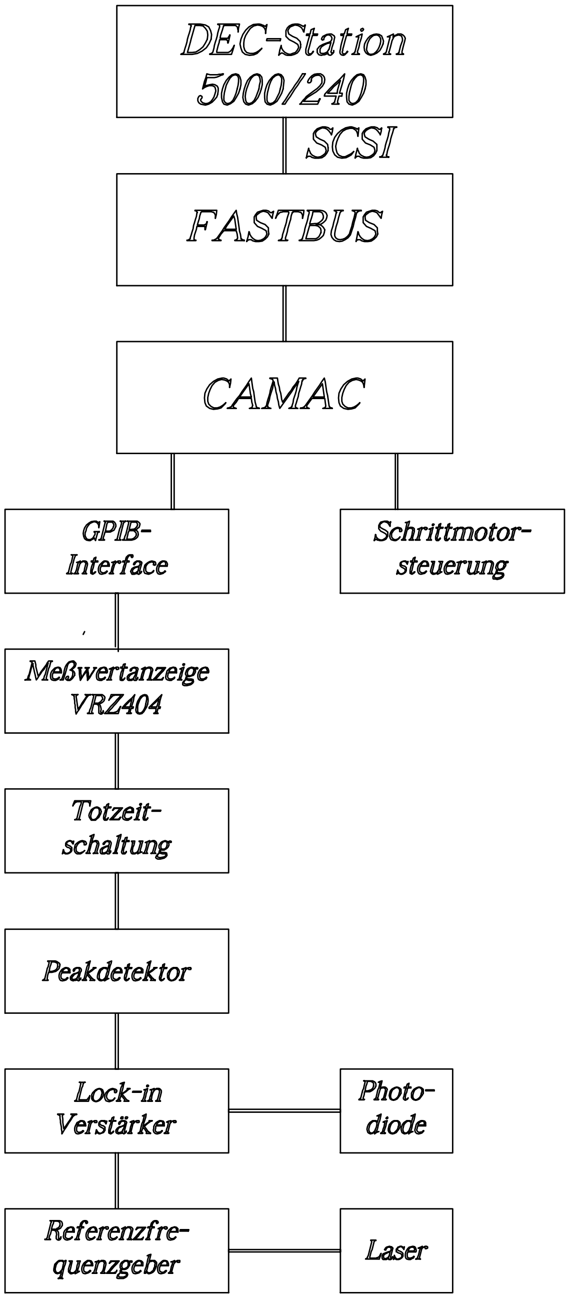

Abb. 5.11: *Schematische Darstellung des Datennahmesystems.*

BUS Standard, mit dem bis zu 15 Geräte parallel angesprochen und ausgelesen werden können. Damit ist es möglich, Datenübertragungsraten von $400 kByte/s$ zu erreichen.

Genauere Angaben über die in Kapitel 5.6 und 5.7 aufgeführten Module finden sich in Anhang A.

6 Meßergebnisse und Datenanalyse

6.1 Meßablauf

Die zwei verschiedenen Einstellungen des Lasers, die als $P+$ und $P-$ bezeichnet werden, machen es notwendig, jede Messung in beiden Einstellungen durchzuführen. Da der Meßweg in zwei Richtungen durchfahren wird (hin und zurück), muß die Meßstrecke viermal zurückgelegt werden. Aus diesen vier Datensätzen werden anschließend Mittelwerte gebildet, welche vom Abstand zwischen Laser und Drahtebene unabhängige Drahtpositionen liefern. Im folgenden wird dieser Ablauf als **eine** Messung bezeichnet.

Die Vermessung aller Komponenten einer Driftkammer kann man in vier Schritte unterteilen (vgl. Abb. 6.1):

1. *Messung im oberen Bereich der aktiven Fläche*
   Ein –Z–Stahlrahmen wird in das Meßsystem eingehängt. Auf diesen wird die Eichplatte befestigt und der Doppel–T–Träger (DTT) wird in der Höhe so verstellt, daß der Laser die Mitte der beiden Fenster in der Platte trifft, in deren Höhe die Messung stattfinden soll. Dann werden die Positionen der sechs Drähte in der Platte bestimmt. Anschließend wird die Platte gegen die Drahtrahmen getauscht, die nacheinander in exakt der gleichen Höhe vermessen werden.

2. *Messung im unteren Bereich der aktiven Fläche*
   Der Meßablauf, der in Punkt 1 beschrieben wurde, wird im unteren Bereich der aktiven Fläche wiederholt, so daß folglich alle Drahtpositionen in zwei verschiedenen Höhen vermessen worden sind.

3. *Positionsbestimmung der äußeren Vermeßmarken am –Z–Rahmen*
   Nach den Messungen im aktiven Bereich der Kammer, wird der DTT in der Höhe so verstellt, daß der Laserstrahl ca. 2 cm unterhalb des Stahlrahmens ist. Dies ist die Höhe, in der im Experiment die Zonenplatten für die Detektorvermessung montiert sind. Zur Bestimmung deren genauer Position müssen die Positionen der Befestigungsplatten vermessen werden. Dazu wird erneut die Eichplatte montiert und die Fenster unterhalb des Stahlrahmens werden abgefahren. Danach werden im Stahlrahmen die Montageplatte und darauf die Hilfsplatte befestigt (vgl. Abb. 5.8), die dazu dient, die Position der Montageplatte zu bestimmen. In der gleichen Höhe werden zusätzlich noch die Hilfsmodule vermessen, welche die Position der Paßbohrungen festlegen (vgl. Abb. 5.9), in denen die optischen Vermeßmarken befestigt werden.

4. *Positionsbestimmung der äußeren Vermeßmarken am +Z–Rahmen*
   Am +Z–Rahmen sind keine Paßbohrungen für die optischen Vermeßmarken vorhanden. Deshalb wird lediglich die Montageplatte für das Laser–Vermessungssystem analog zu dem Verfahren in Punkt 3 vermessen.

Alle gemessenen Drahtpositionen werden in Datenfiles gespeichert, die von der Auswertesoftware eingelesen und anschließend analysiert werden können.

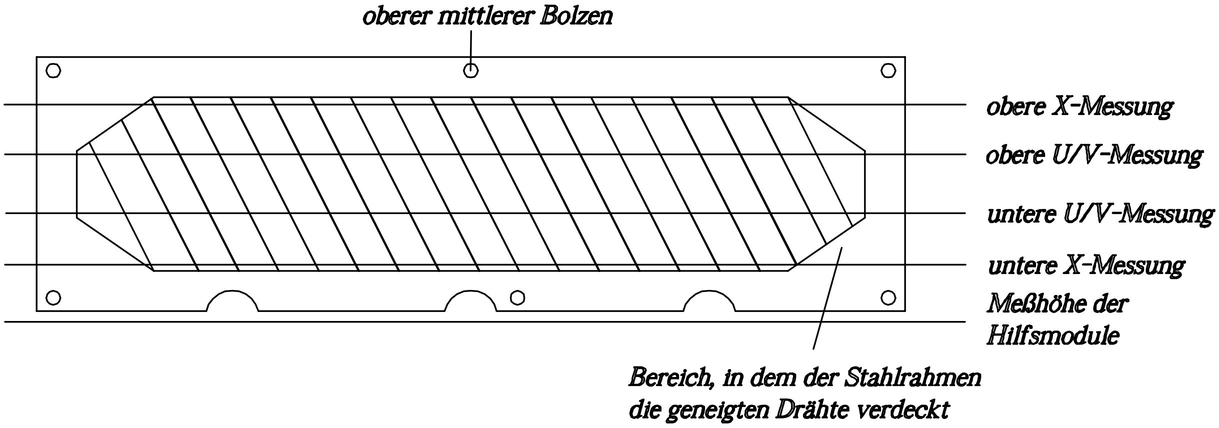

Abb. 6.1: *Erläuterung der verschiedenen Meßhöhen.*

6.2 Reproduzierbarkeit der Messung

6.2.1 Wiederholgenauigkeit

Ein erster wichtiger Test in einem solchen Meßsystem ist die Überprüfung der Wiederholgenauigkeit. Dafür wurde ein Drahtrahmen in dem Gestell montiert und sechzehnmal nacheinander in derselben Einstellung (P+) gemessen. Die jeweiligen Messungen der einzelnen Drähte wurden in Histogramme gespeichert. Dabei fällt auf, daß es Drähte gibt, die mit sehr großer Genauigkeit immer am gleichen Ort gemessen werden (vgl. Abb. 6.2). Andererseits gibt es aber auch Drähte, deren Meßwerte stärker streuen (vgl. Abb. 6.2). Dies kann die Folge einer Verschmutzung sein, was in Kapitel 6.2.3 näher erläutert wird.

Um eine Abschätzung über die Genauigkeit der Messung zu erhalten, wurde von allen Drähten deren mittlere Position bestimmt. Anschließend wurden sämtliche Abweichungen von den Mittelwerten in ein Histogramm gebucht, woraus man die durchschnittliche Genauigkeit der Messung ablesen kann (vgl. Abb. 6.3).

Die Breite der Verteilung ist mit $\sigma = 11.5$ μm ein Maß für die Wiederholgenauigkeit der Messung. Wenn man die Potential- und Signaldrähte getrennt betrachtet, fällt auf, daß in der Wiederholgenauigkeit kein Unterschied zwischen den verschiedenen Dicken gemessen werden kann. Mit einer Meßgenauigkeit von 11.5 μm liegt man deutlich unter dem Wert von 30 μm, der als Zielwert der Messung angestrebt war.

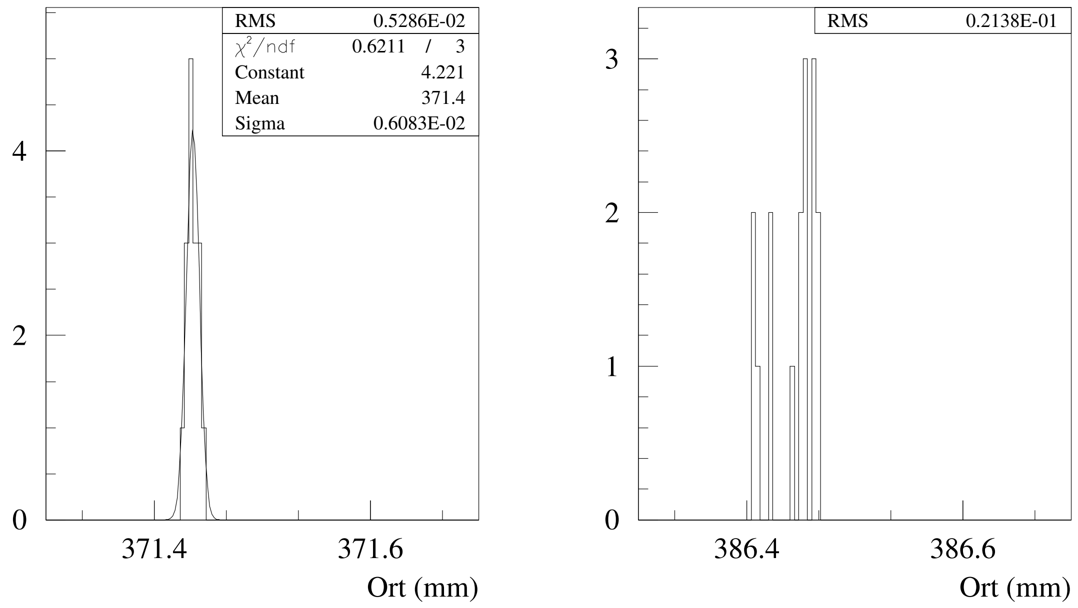

Abb. 6.2: *Auf der linken Seite ist die Messung eines Drahtes gezeigt, dessen Position jedesmal sehr genau bestätigt wurde. Auf der rechten Seite hingegen streuen die Meßwerte des Drahtes sehr stark.*

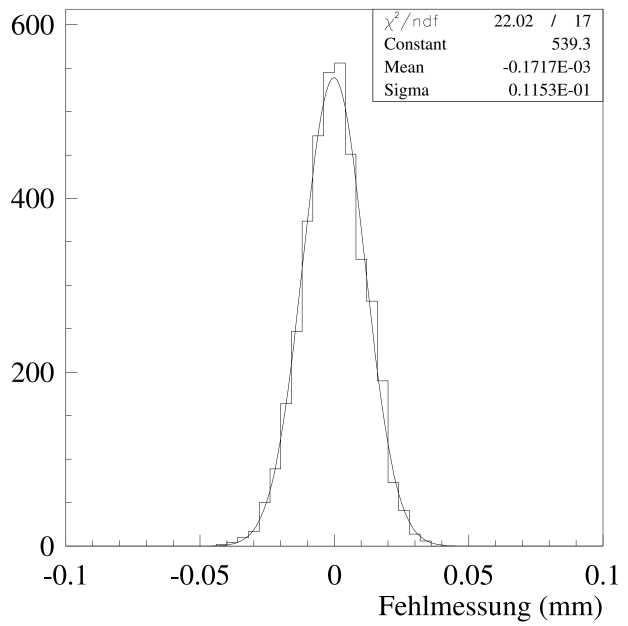

Abb. 6.3: *Abweichung aller Drahtpositionen bei* 16*–facher Messung der* 249 *Drähte eines X–Rahmens.*

6.2.2 Reproduzierbarkeit aufgrund der Umsetzung

Die Montage des Lasers unter 10° erfordert, wie in Kapitel 5.3.2 dargestellt, ein Umsetzen der Lichtschranke um 180°. Bei einer erneuten Durchführung der Meßreihe aus Kapitel 6.2.1 zur Überprüfung der Wiederholgenauigkeit, wurde diesmal die Lichtschranke nach jeder Messung um 180° gedreht. Daraus erhält man für die Einstellungen P+ und P− die Reproduzierbarkeit der einzelnen Drahtpositionen mit Umsetzfehler. Bei der Analyse der P+ Daten analog zu Kapitel 6.2.1 erhält man eine etwas breitere Verteilung für die Abweichung aller Drahtpositionen (vgl. Abb. 6.4).

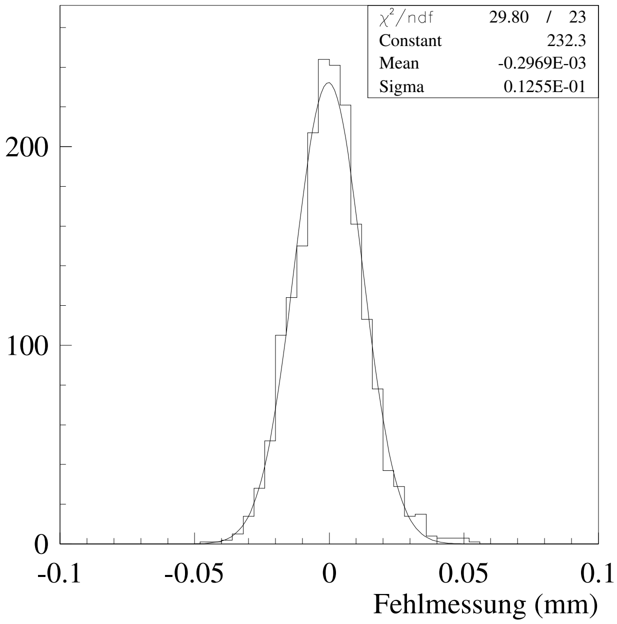

Abb. 6.4: *Abweichung der Drahtpositionen bei achtfacher Messung eines X–Rahmens, wobei nach jeder Messung die Lichtschranke neu positioniert wurde.*

Die Breite dieser Verteilung ist mit $\sigma = 12.5\ \mu$m nur unwesentlich größer als der Wert von 11.5 μm bei der reinen Messung der Wiederholgenauigkeit. Aus diesen beiden Werten kann man den Fehler berechnen, der durch das Umsetzen der Lichtschranke verursacht wird, da sich der Umsetzfehler und der Meßfehler quadratisch zu dem Gesamtfehler addieren.

$$\text{Umsetzfehler} = \pm\sqrt{12.5^2 - 11.5^2}\ \mu m \ \approx\ \pm 5\ \mu m \tag{6.1}$$

Das Umsetzen trägt zwar mit einem Fehler von 5 μm zum Gesamtfehler der Meßapparatur bei, ist aber im Vergleich zu anderen Fehlern, wie der Drahterkennung, vernachlässigbar.

6.2.3 Meßgenauigkeit in Abhängigkeit der Drahtverschmutzung

Im Kapitel 6.2.1 wurde schon angesprochen, daß die Genauigkeit, mit der ein Draht gemessen werden kann, mit der Sauberkeit des Drahtes zusammenhängt. Die Ursache hierfür können zum Beispiel Staubpartikel sein, die sich auf dem Draht festgesetzt haben und diffus reflektieren. Es wäre aber auch denkbar, daß beim Einlöten Flußmittel auf den Draht gekommen ist, das die gesamte Reflexionsstärke reduziert. Ein solcher Draht, der nur noch sehr schlecht reflektiert, kann nicht mehr exakt gemessen werden, da das Reflexionssignal zu schwach ist. Gelegentlich werden solche Drähte überhaupt nicht mehr erkannt. Dazu ist ein Beispiel in Abbildung 6.5 gezeigt. Ein Signaldraht wurde fünfzehnmal nacheinander gemessen und anschließend mit Aceton gereinigt. Danach wurde die Messung erneut durchgeführt (vgl. Abb. 6.5). Man erkennt deutlich, daß sich die Reproduzierbarkeit verbessert, was sehr stark darauf hindeutet, daß ungenügend gereinigte Drähte schlechter gemessen werden können.

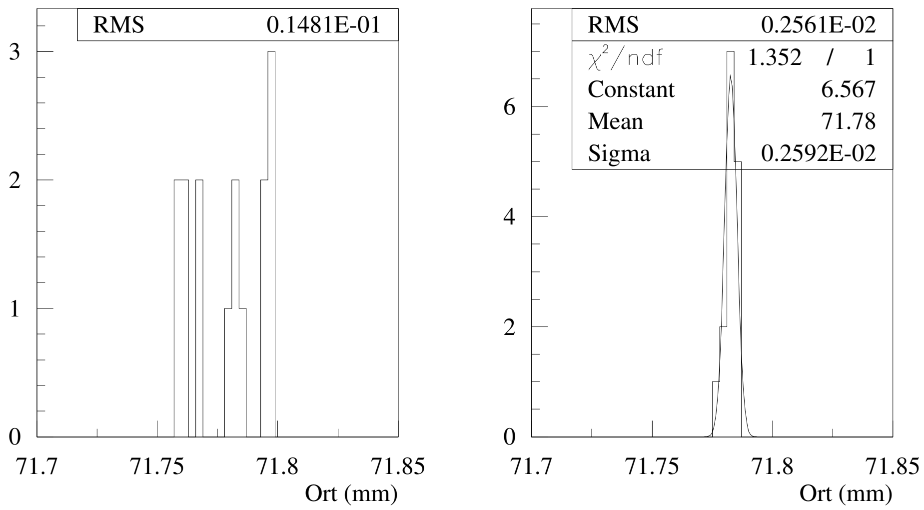

Abb. 6.5: *Auf der linken Seite ist die Streuung der gemessenen Positionen eines verschmutzten Drahtes zu sehen. Nach der Reinigung des Drahtes mit Aceton wurde die Meßreihe erneut durchgeführt, wobei nun die Genauigkeit seiner Ortsbestimmung erheblich besser war.*

Bei dem Bau der Drahtrahmen wurde selbstverständlich immer darauf geachtet, eine optimale Sauberkeit der Drähte zu gewährleisten. Der in Abbildung 6.5 gezeigte Fall ist lediglich eine Ausnahme, bestätigt jedoch deutlich den Zusammenhang zwischen Drahtverschmutzung und Reproduzierbarkeit der Messung.

6.3 Meßergebnisse der X–Rahmen

Zwischen der Datenanalyse der X– und der U/V–Rahmen bestehen einige Unterschiede, die es erforderlich machen, diese beiden Rahmensorten getrennt voneinander auszuwerten. Obwohl der prinzipielle Ablauf der Auswertung bei allen Drahtrahmen derselbe ist, verursachen vor allem die unterschiedlichen Neigungswinkel der Drähte Komplikationen, da der Drahtabstand in die Auswertung mit eingeht (vgl. Kap. 6.3.1). Außerdem sind bei U/V–Rahmen die Meßlängen, die abgefahren werden müssen, größer, da es vermieden wurde, kürzere Drähte in den Ecken der aktiven Fläche einzubauen (vgl. Abb. 3.2).

6.3.1 Unkorrigierte Daten

Zur Auswertung der gemessenen Drahtpositionen eines Rahmens wählt man den ersten Draht als Referenz und berechnet durch Addition des Sollabstands zu den anderen Drähten, deren Sollposition. Trägt man danach die Abweichungen der Drähte von ihren errechneten Sollpositionen auf, dann ergeben sich für die beiden Einstellungen $P+$ und $P-$ verschiedene Verteilungen. In Abbildung 6.6 sind diese für zwei Messungen an dem X9–Rahmen in der oberen und unteren Meßhöhe dargestellt.

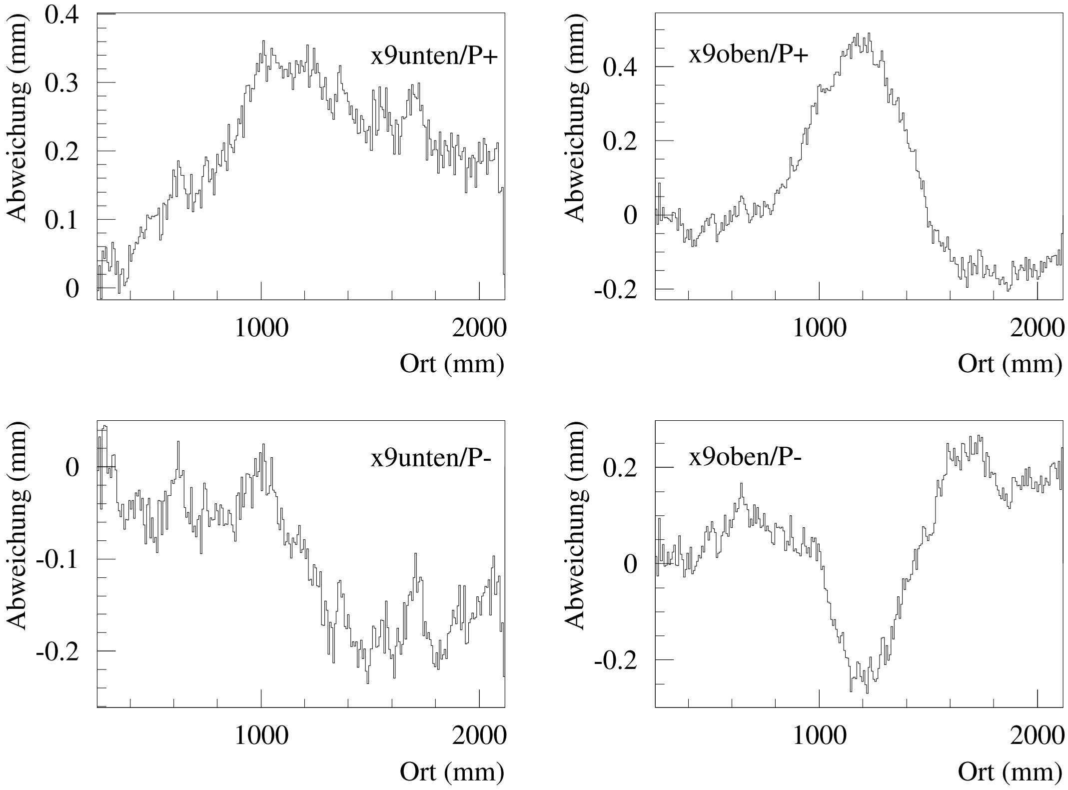

Abb. 6.6: *Aufgrund des Einfallswinkels ist die Messung auf Abstandsschwankungen sensitiv. Deshalb weichen die Messungen für die Einstellungen P+ und P– stark voneinander ab.*

Dies zeigt, daß der Abstand zwischen Laser und Drahtebene, wie angenommen, variiert (vgl. Kapitel 5.3.2). Aus der Differenz der Drahtpositionen in den beiden Einstellungen P+ und P− kann man die Abstandsänderung zwischen Laser und Drahtebene berechnen. Der erste Draht wird als Referenz gewählt und für alle weiteren Drähte wird die relative Abstandsänderung zu diesem ersten Draht berechnet.

$$\Delta d = \Delta d_N - \Delta d_1 = \frac{\Delta x_N}{2 \tan 10^\circ} - \frac{\Delta x_1}{2 \tan 10^\circ} \tag{6.2}$$

Dabei ist Δx_N die Differenz der P+ und P− Messung des N–ten Drahts. Die Abstandsschwankung der Messungen in den beiden Höhen ist in Abb. 6.7 gezeigt.

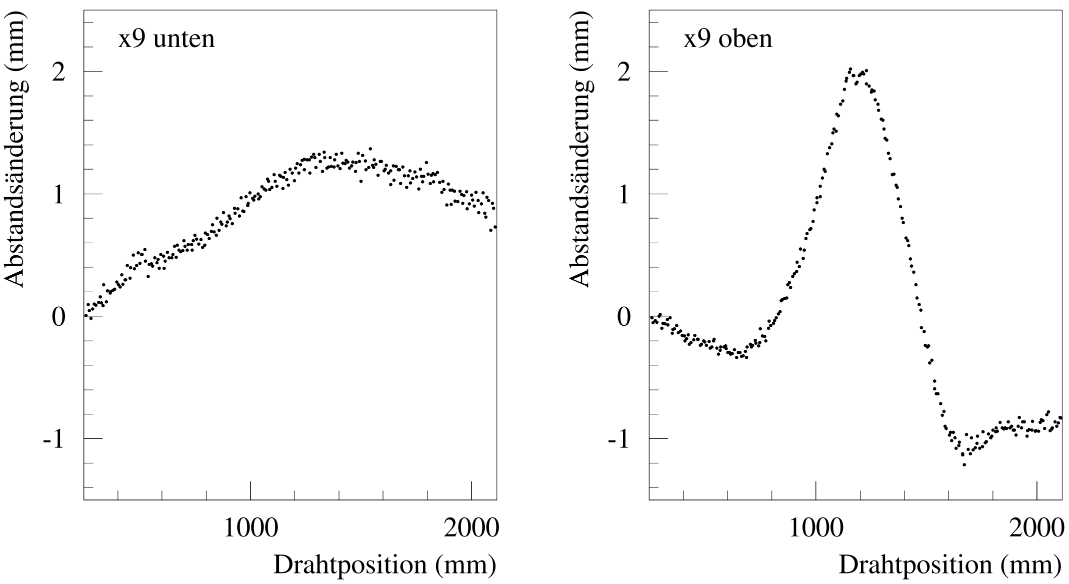

Abb. 6.7: *Aus Messungen in unterschiedlichen Einstellungen der Laserlichtschranke kann man den Abstand zwischen Drahtebene und Laser berechnen.*

Diese Schwankungen resultieren aus einer Unebenheit der Stahlrahmen, die eine Fertigungstoleranz von ±0.5 mm in der Planarität aufweisen dürfen. Die Abstandsschwankungen in der oberen Einstellung weichen jedoch extrem von diesem Wert ab. Dies ist darauf zurückzuführen, daß dieser Drahtrahmen nicht richtig auf dem Stahlrahmen befestigt war.

Um abstandsunabhängige Drahtpositionen zu erhalten, muß der Mittelwert der beiden Einstellungen $P+$ und $P-$ gebildet werden. Es ist aber deutlich zu erkennen, daß die Abweichungen von den Sollpositionen immer noch erheblich sind. Bei dem Vergleich verschiedener Messungen (vgl. Abb. 6.8) fällt jedoch sofort auf, daß eine gewisse Systematik in den Verteilungen vorhanden ist.

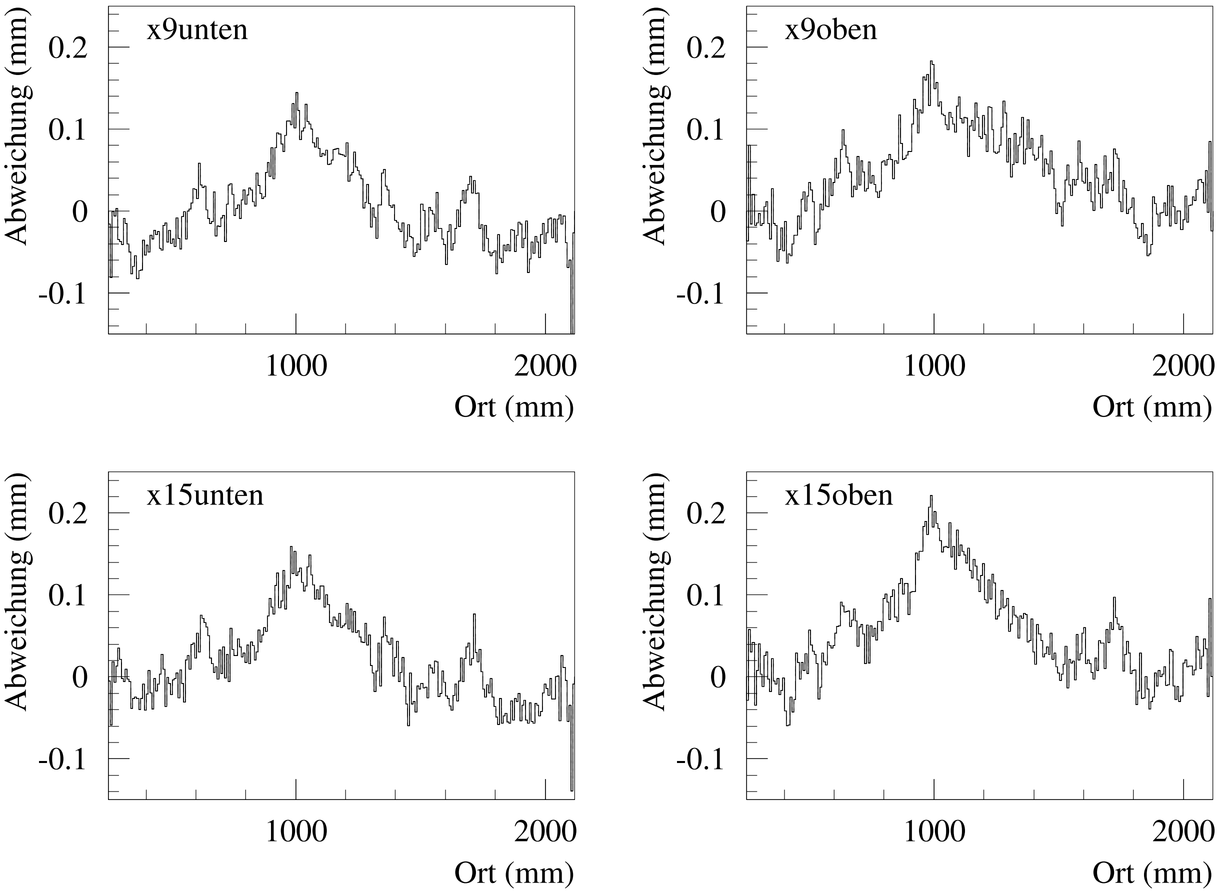

Abb. 6.8: *Vier Messungen der Abweichungen der Drähte von den Sollpositionen an verschiedenen Drahtrahmen.*

Dies wird noch deutlicher, wenn man die verschiedenen Messungen mit einem Polynom fittet und alle Fitfunktionen in einen Plot einzeichnet (vgl. Abb. 6.9). Diese Fitfunktionen führen statistische Schwankungen in einem Bereich von $\pm 50\ \mu$m aus. Darüber hinaus folgen sie in guter Übereinstimmung einer gemeinsamen Tendenz. Es stellt sich die Frage, ob diese systematischen Fehler von der Meßapparatur verursacht werden oder ob es systematische Fehler der Drahtrahmen sind. Bei einer Kontrollmessung konnte gezeigt werden, daß die systematischen Fehler aufgrund von Nichtlinearitäten in der Laserführung verursacht werden. Dies wird in Kapitel 6.6 ausführlich erläutert.

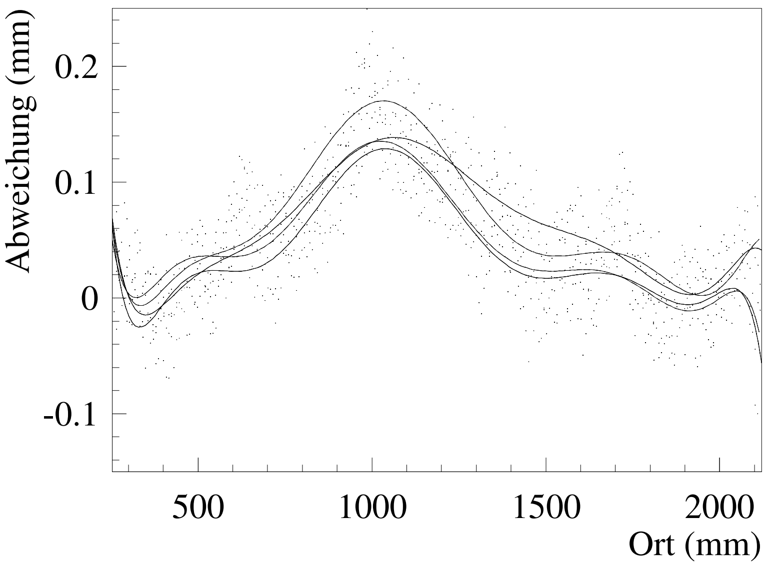

Abb. 6.9: *Vergleich von vier verschiedenen Fitfunktionen.*

6.3.2 Korrektur und Analyse der gemessenen Daten

Die systematischen Fehler aufgrund der Nichtlinearitäten in der Laser–Führung werden folgendermaßen korrigiert: Aus allen berechneten Abweichungen der gemessenen Drahtpositionen von ihren Sollpositionen wird ein Mittelwert gebildet. Dieser enthält alle systematischen Fehler, die von der Lineareinheit verursacht werden (vgl. Abb. 6.10). Die statistischen Abweichungen der einzelnen Drahtrahmen sind in diesem Mittelwert enthalten, fallen aber bei einer größeren Anzahl von Messungen nicht ins Gewicht. Im weiteren Verlauf der Auswertung wird dieser Mittelwert als Korrekturwert bezeichnet.

Um korrigierte Daten ohne systematische Meßfehler aus den Einzelmessungen zu erhalten, wird der Korrekturwert von den Einzelmessungen subtrahiert. Damit erhält man die realen Abweichungen der einzelnen Drähte. Alle systematischen Fehler, die von der Lineareinheit verursacht wurden, werden auf diese Weise korrigiert. Die noch verbleibenden Abweichungen entsprechen den eigentlichen Fehlpositionen der Drähte, die mit der Meßapparatur gemessen werden sollen (vgl. Abb. 6.11). Sie werden zum Beispiel durch Fehlpositionen der Bohrungen für die Paßstifte verursacht, um die die Drähte in einem Winkel von 5° gelegt werden. Wenn man die Verteilung dieser Positionsfehler der Drähte (vgl. Abb. 6.12) näher betrachtet, fällt folgendes auf:

1. Die Breite der Verteilungen liegt mit ca. 19 μm im Bereich der Toleranzangaben ± 20 μm der Firma Stesalit, welche die Rahmen gefertigt hat. Man muß hierfür aber berücksichtigen, daß die Ungenauigkeit der Lochbohrung nicht der einzige Fehler ist, der in die Drahtposition eingeht. Die Position der Drähte ist vorgegeben durch Plastikstifte aus Polyoxymethylen (POM), die in die Paßbohrungen der Stesalit–Rahmen eingesetzt werden. Die Drähte werden in einem 5° Winkel um diese Stifte gelegt und dann festgelötet. Da die Oberfläche der POM Stifte nicht exakt glatt ist

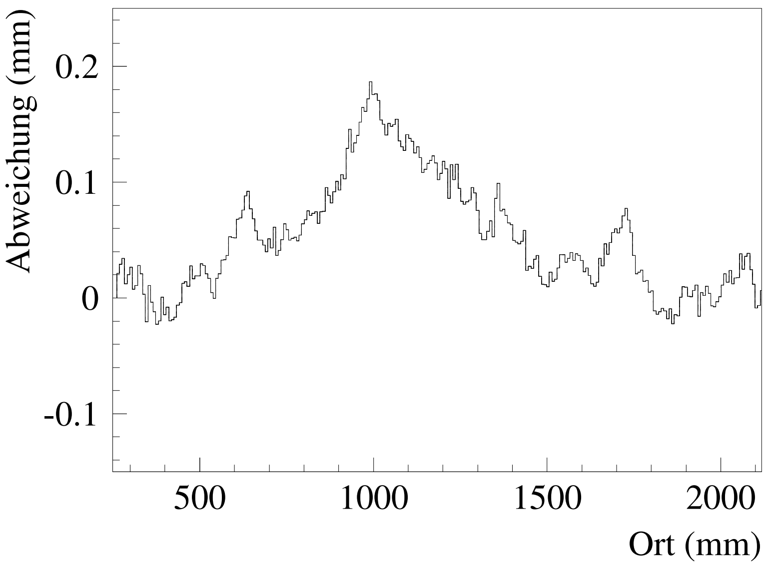

Abb. 6.10: *Aus den verschiedenen Einzelmessungen gebildeter Korrekturwert.*

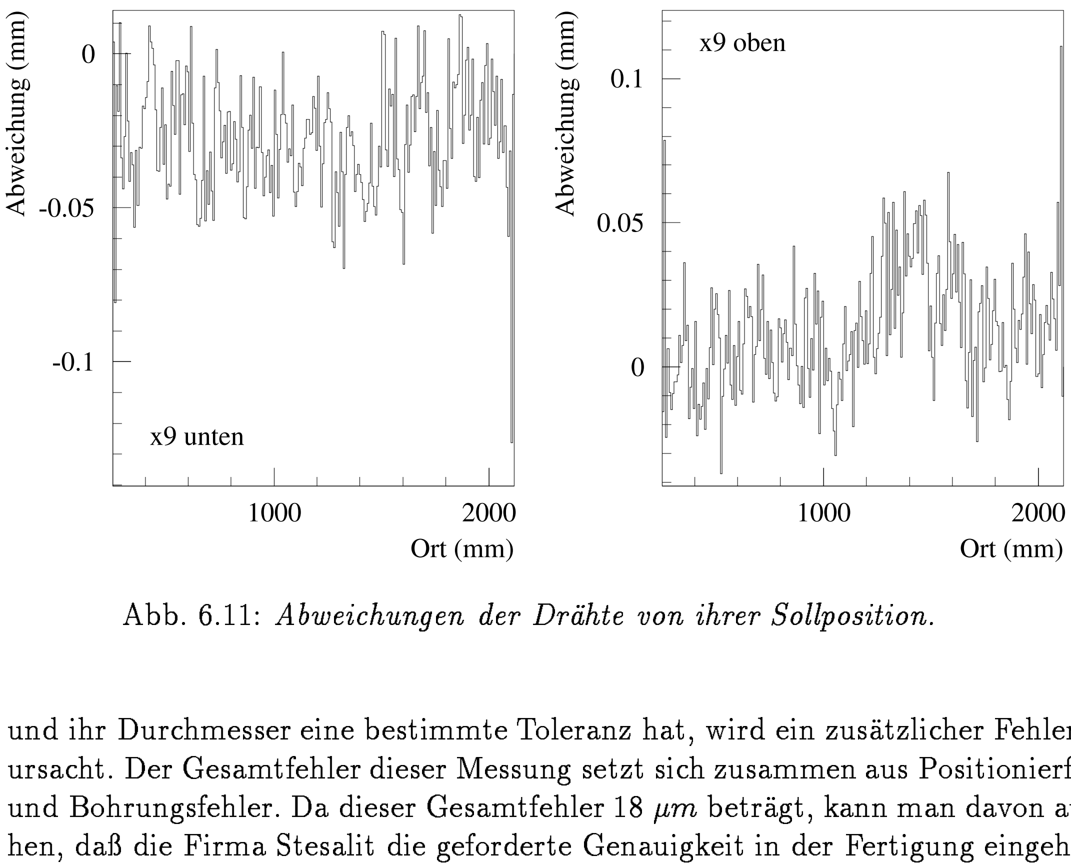

Abb. 6.11: *Abweichungen der Drähte von ihrer Sollposition.*

und ihr Durchmesser eine bestimmte Toleranz hat, wird ein zusätzlicher Fehler verursacht. Der Gesamtfehler dieser Messung setzt sich zusammen aus Positionierfehler und Bohrungsfehler. Da dieser Gesamtfehler 18 μm beträgt, kann man davon ausgehen, daß die Firma Stesalit die geforderte Genauigkeit in der Fertigung eingehalten hat.

2. Der Mittelpunkt der Verteilung liegt nicht exakt im Nullpunkt (vgl. Abb. 6.12). Dies folgt aus der Bestimmung des ersten Drahtes als Referenzpunkt. Ein Abweichen

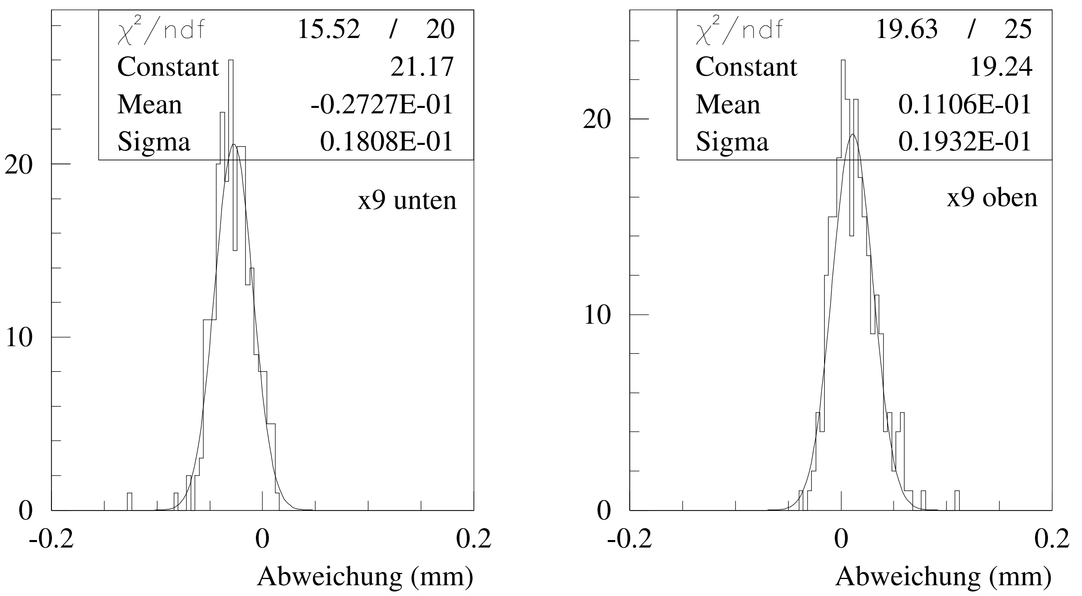

Abb. 6.12: *Verteilung der Abweichungen der Drähte von ihrer Sollposition.*

dieses ersten Drahtes um 30 μm von seiner Sollposition führt dazu, daß auch der Mittelwert der Verteilung um genau diese 30 μm von dem Nullpunkt abweicht, da für alle Drahtpositionen ein falscher Sollwert berechnet wird. Bei der späteren Berechnung von absoluten Drahtpositionen muß berücksichtigt werden, daß jeder Drahtrahmen einen unterschiedlichen Bezugspunkt seiner Drahtpositionen besitzt.

3. Der zweite und der vorletzte Draht, also der erste und letzte Signaldraht, weisen bei jeder Messung einen bemerkenswerten Meßfehler auf. Dies beruht darauf, daß die letzten beiden Driftzellen auf jeder Seite nicht zum aktiven Bereich zählen. Diese Zellen sind nur dafür vorgesehen, daß die aktiven Zellen am Rand die gleiche elektrische Feldkonfiguration wie die Zellen in der Mitte aufweisen. Dadurch soll ein exakt gleiches Verhalten der Kammer über ihren gesamten aktiven Bereich ermöglicht werden. Da in der jeweils letzten Zelle ein inhomogenes elektrisches Feld besteht, wäre die Feldstärke an der Oberfläche eines 25 μm dünnen Signaldrahts größer als bei allen anderen Zellen. Um einen dadurch hervorgerufenen größeren Strom in der Kammer zu vermeiden, muß an dieser Stelle ein dickerer Draht verwendet werden. Aus diesem Grund wurde in die jeweils letzte Zelle ein 127 μm dicker Potentialdraht und sicherheitshalber ein 50 μm dicker Kupfer–Beryllium–Draht in die jeweils vorletzte Zelle eingelötet. Weist der eingelötete Draht einen falschen Durchmesser auf, folgt daraus, daß die Position des Drahtes um den halben Durchmesserunterschied von der Sollposition abweicht. Das sind bei dem 127 μm Potentialdraht anstelle des 25 μm Signaldrahts (127 μm - 25.4 μm)/2 = 50.9 μm.

Eine Abweichung von ca. 50 μm sollte bei einer Verteilung mit einem Sigma von 18 μm deutlich zu erkennen sein. In Abbildung 6.12 erkennt man, daß ein Draht bei ca. –90 μm liegt und somit um ca. 60 μm vom Mittelwert der Verteilung abweicht. Dies ist einer der beiden dickeren Signaldrähte. Der zweite weicht aufgrund statistischer Fluktuationen nur geringer von seiner Sollposition ab und liegt im linken Bereich der Verteilung.

6.3.3 Anbindung an ein äußeres Koordinatensystem

Alle bisher durchgeführten Messungen können nur für Aussagen im eindimensionalen Bereich herangezogen werden. Um aus diesen eindimensionalen Daten absolute Drahtpositionen in einem äußeren Koordinatensystem, wie dem der Driftkammer, zu errechnen, muß man die Meßergebnisse mit den Daten der Plattenmessung analysieren.

Dazu werden zuerst die Positionen der Drähte auf der Eichplatte aus den genau gemessenen Koordinaten der Paßbohrungen berechnet. Als Koordinatensystem der Platte wurde das Kammerkoordinatensystem gewählt, in dessen Ursprung sich der obere mittlere Bolzen befindet. Anschließend werden die tatsächlich mit der Meßapparatur gemessenen Positionen dieser Drähte eingelesen. Aus den Abständen der senkrechten und um 45° geneigten Drähte kann dann auf die Höhe zurückgerechnet werden, in der die Messung über den Fenster stattgefunden hat (vgl. Abb. 5.7). Durch die Korrektur der systematischen Fehler (vgl. Kap. 6.3.2) liegen die gemessenen Drahtpositionen auf einer Geraden, die von den beiden, mit Hilfe der Fenstern gemessenen Positionen, vorgegeben ist.

Um eine Umrechnung des Koordinatensystems der eindimensionalen Messung in das Koordinatensystem der Kammer zu ermöglichen, muß der Mittelwert der gemessenen Positionen der beiden senkrechten Drähte in der Platte bestimmt werden. Aus dem Vergleich dieses Mittelwertes und dessen errechneter Position aus der Platteneichung, erhält man eine konstante Verschiebung für die Umrechnung der beiden Koordinatensysteme. Daraufhin werden die gemessenen Werte des Drahtrahmens eingelesen, ihre systematischen Fehler korrigiert (vgl. Kap. 6.3.2) und mit der Verschiebung in Kammerkoordinaten umgerechnet. Aus der Geradengleichung der Messung, welche die Höhe angibt, lassen sich (x,y)–Koordinatenpunkte eines jeden Drahtes für die obere und die untere Messung berechnen. Die Drahtposition ist dann eindeutig durch diese beiden Punkte in dem Koordinatensystem der Kammer bestimmt. Anschließend berechnet man die Position der Drähte in der Höhe der Plastikstifte, um vergleichbare Meßpunkte für jeden Drahtrahmen zu erhalten. Mit einer Sigma–Breite der Verteilung von ca. 20 μm liegt man trotz Extrapolation noch im Bereich der angestrebten Genauigkeit.

Bei einem Vergleich dieser errechneten Positionen mit den in der Konstruktion vorgegebenen absoluten Positionen stellt man eine sehr gute Übereinstimmung fest (vgl. Abb. 6.13).

Dies zeigt, daß die Positionen der einzelnen Paßbohrungen zueinander innerhalb der Toleranz liegen und auch, daß ihre Position in Bezug auf die mittlere obere Paßbuchse, die auf den mittleren oberen Bolzen montiert wird, mit den Vorgaben übereinstimmt. Letzteres wird aus dem Mittelwert der Gaußverteilung deutlich, der bei beiden Messungen weniger als 10 μm von dem in der Konstruktion vorgegebenen Wert abweicht.

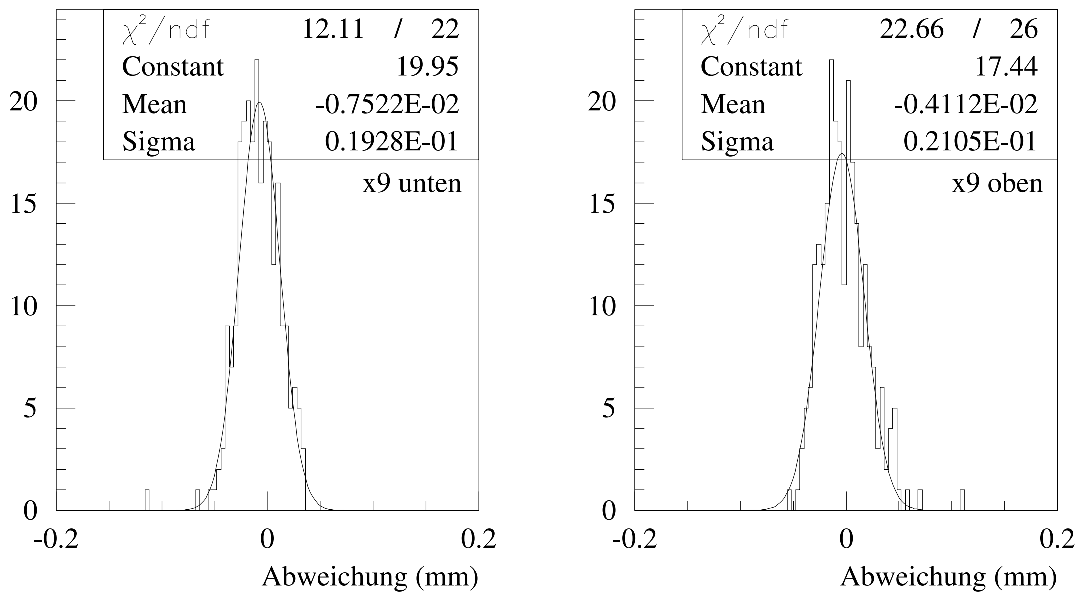

Abb. 6.13: *Unterschied Messung–Konstruktion.*

Die für jeweils zwei verschiedene Höhen errechneten Drahtpositionen (vgl. Abb. 6.1), werden in ADAMO–Tabellen abgespeichert. ADAMO ist Bestandteil der HERMES Analysesoftware und wurde deshalb für die Datenverwaltung der Drahtpositionen gewählt, damit die Möglichkeit besteht, die Korrekturwerte leicht in die im Experiment verwendeten Datenbanken einzubauen und als exakte Drahtpositionen in der Spurrekonstruktion zu verwenden.

6.4 Meßergebnisse der U/V–Rahmen

Die bisherigen Ausführungen beschränkten sich lediglich auf die Meßergebnisse von X–Rahmen. Im folgenden Kapitel wird die Datenauswertung für U/V–Rahmen skizziert, welche prinzipiell analog zu dem im letzten Kapitel beschriebenen Verfahren funktioniert. Der Grund, warum die Auswertung nicht parallel vorgenommen werden kann, besteht darin, daß die Korrekturwerte für die verschiedenen Drahtwinkel leicht variieren (vgl. Abb. 6.14).

Ein unterschiedlicher systematischer Meßfehler zwischen den U, X und V–Rahmen entsteht, wenn der Laser die Drahtrahmen nicht exakt auf einer Gerade abfährt. Kleine Höhenschwankungen machen sich bei den senkrechten Drähten des X–Rahmens nicht bemerkbar, jedoch wird bei U und V die Position aufgrund der Drahtneigung um die halbe Höhenschwankung falsch gemessen, wobei die Abweichung für U und V ein unterschiedliches Vorzeichen aufweist.

Mit Hilfe dieser Korrekturwerte erhält man analog zu der X–Auswertung die Verteilung der Drahtpositionen, die in Abbildung 6.15 dargestellt ist. Die Breite der Verteilung liegt mit einem Sigma von 20 μm in der Größenordnung der typischen Werte für X–Rahmen.

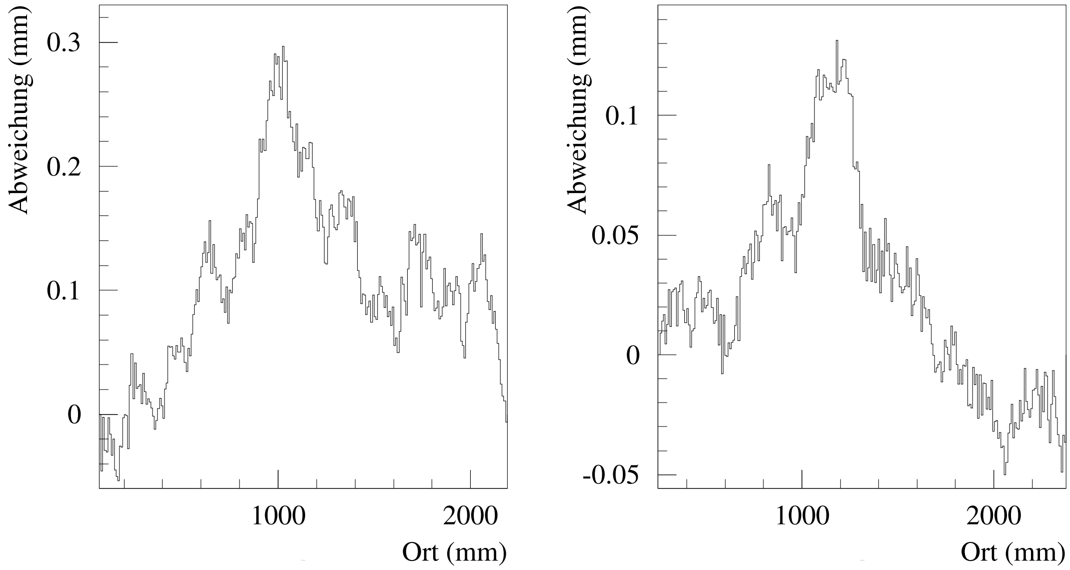

Abb. 6.14: *Korrekturwert für den V–Rahmen (links) und den U–Rahmen (rechts).*

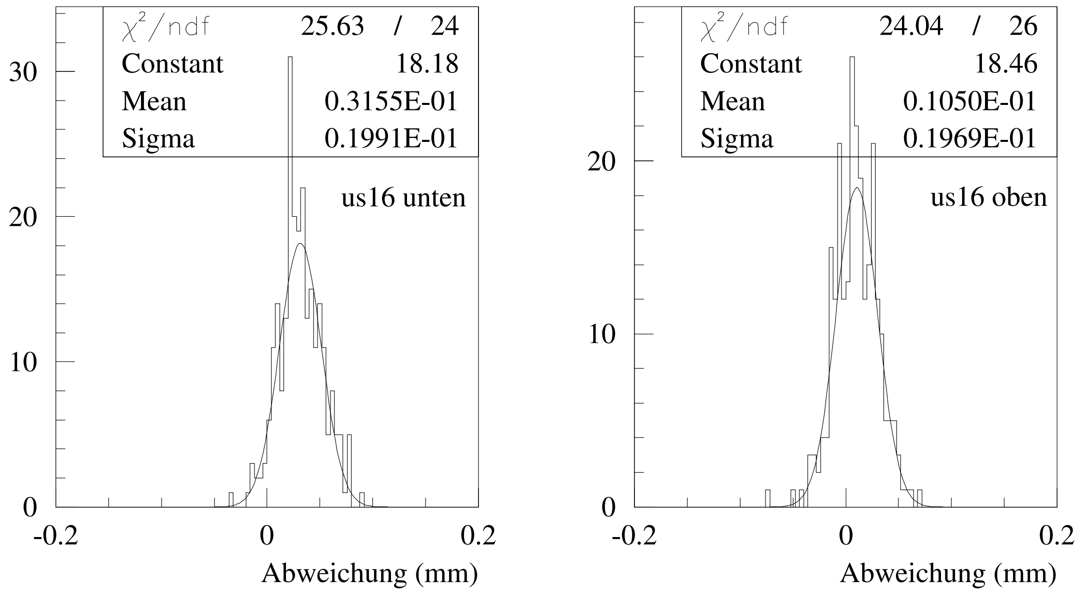

Abb. 6.15: *Verteilung der Drahtpositionen eines U–Rahmens.*

Aus diesen korrigierten Drahtpositionen und den Informationen aus der Plattenmessung berechnet man anschließend die Absolutkoordinaten der Drähte im Kammersystem und extrapoliert die Drahtposition auf die Höhe der Plastikstifte. Durch diese Extrapolation verbreitert sich die Verteilung der Drahtpositionen. Hierbei ist jedoch zu beachten, daß die Verbreiterung stärker als für X-Drähte ist, da zusätzlich eine Ungenauigkeit der y–Position in die Extrapolation mit eingeht (vgl. Abb. 6.16).

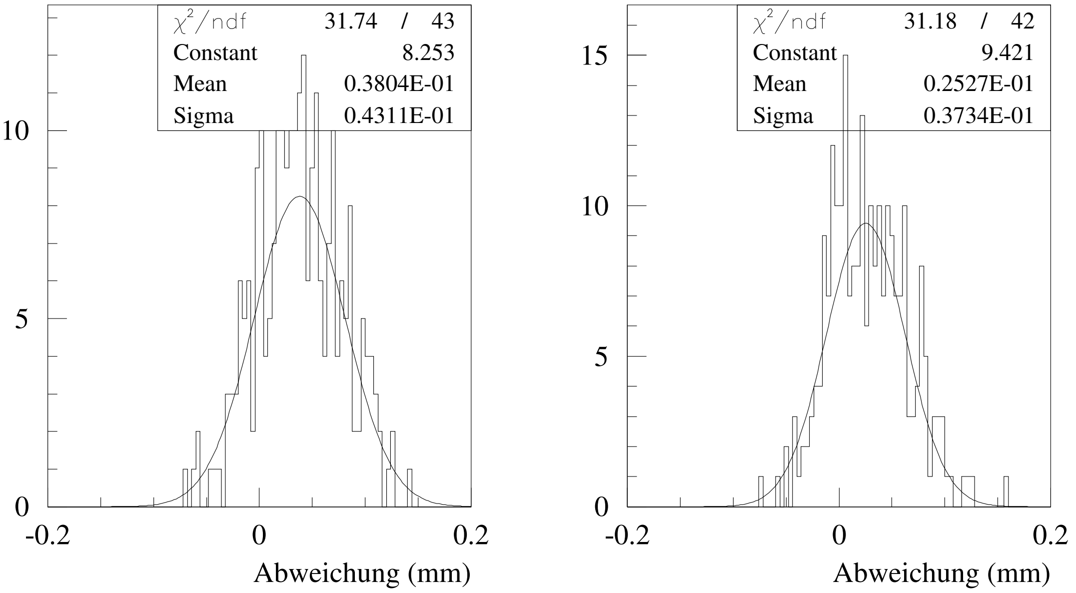

Abb. 6.16: *Verteilung der Drahtpositionen, in Bezug auf den in der Konstruktion vorgegebenen Sollwert, nach der Extrapolation auf die Höhe der Plastikstifte.*

6.5 Berechnung des Extrapolationsfehlers

Extrapoliert man, wie in Kap. 6.3.3 erläutert, von den gemessenen Drahtpositionen (oben und unten) auf die Höhe der Positionsstifte, vergrößern sich die Fehler, die mit Hilfe der Fehlerfortpflanzung berechnet werden können. Dazu ist es notwendig, die Fehler in beiden Höhen der Messung zu kennen. Der Fehler in x–Richtung entspricht der Wiederholgenauigkeit (vgl. Kap. 6.2.1) und der in y–Richtung kann aus dieser berechnet werden.

6.5.1 Meßfehler in der aus den beiden Fenstern der Eichplatte bestimmten y–Position

Die y–Position wird aus den gemessenen Orten der Drähte in den beiden Fenstern der Eichplatte bestimmt (vgl. Abb. 5.7 und Abb. 5.8). Diese beiden Fenster benötigt man, um daraus die Gleichung der Gerade zu berechnen, auf welcher der Laser während der Messung die Drähte abfährt. Aus dieser Geradengleichung wiederum wird dann die y–Koordinate einer jeden Drahtmessung bestimmt.

Da der Winkel, den die geneigten Drähte mit dem senkrechten Draht einschließen, 45° beträgt, ist die Meßhöhe direkt proportional zum gemessenen Abstand:

$$y = x_{l/r} - x_m + \text{konst.} \tag{6.3}$$

Hierbei ist $x_{l/r}$ die gemessene Position des linken bzw. rechten Drahts, x_m ist die Position des mittleren.

Der Fehler in der y–Positionsbestimmung eines senkrechten und eines geneigten Drahts kann aus der Genauigkeit der Ortsmessung der beiden Drähte mittels Fehlerfortpflanzung berechnet werden. Die Genauigkeit der Ortsmessung entspricht der Wiederholgenauigkeit von 11.5 μm, die in Kap. 6.2.1 diskutiert wurde:

$$\sigma_{y_i} = \sqrt{(\frac{\partial y}{\partial x_i}\,\sigma_{x_i})^2 + (\frac{\partial y}{\partial x_m}\,\sigma_{x_m})^2} = 16\ \mu\text{m} \qquad \text{mit: } i = l, r \tag{6.4}$$

Mit den drei Drähten eines Fensters wird die Höhe zweimal bestimmt und anschließend der Mittelwert gebildet. Deshalb beträgt der Fehler der Höhenmessung pro Fenster:

$$\sigma_y = \frac{\sigma_{y_i}}{\sqrt{2}} = 11.5\ \mu\text{m} \tag{6.5}$$

6.5.2 Meßfehler der Geradengleichung

Diese Geradengleichung ist zur Bestimmung der y–Positionen der Drahtmeßpunkte notwendig. Sie läßt sich aus den beiden mit der Eichplatte gemessenen Punkten berechnen. Ihr Fehler ist jedoch von der x–Position abhängig (vgl. Abb. 6.17):

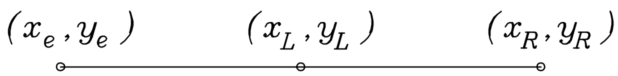

Abb. 6.17: *Erläuterung der Variablen, die zur Berechnung des Fehlers der Geradengleichung verwendet werden. Hierbei ist x_e die gemessene x–Koordinate eines Drahts, an der die Höhe y_e berechnet werden soll. $x_{L/R}$ sind die gemessenen x–Koordinaten der mittleren Drähte der Eichplatte und $y_{L/R}$ die aus den drei Drähten eines Fensters berechnete Höhe. Der Index L bzw. R bezieht sich auf das linke bzw. rechte Fenster.*

$$\frac{y_L - y_e}{x_L - x_e} = \frac{y_R - y_L}{x_R - x_L} \tag{6.6}$$

$$\Rightarrow\ y_e = y_L - \frac{x_L - x_e}{x_R - x_L} \cdot (y_R - y_L) \tag{6.7}$$

Aus dieser Bestimmungsgleichung der y–Position eines extrapolierten Punkts auf der Gerade kann man mit Hilfe der Fehlerfortpflanzung den Höhenfehler berechnen. Mit $\sigma_{y_L} = \sigma_{y_R}$ und $|y_R - y_L| \ll |x_R - x_L|$ gilt:

$$\sigma_{y_e} = \sqrt{\Big(\frac{\partial y_e}{\partial y_L}\sigma_{y_L}\Big)^2 + \Big(\frac{\partial y_e}{\partial y_R}\sigma_{y_R}\Big)^2} = \sigma_{y_L} \cdot \sqrt{\Big(\frac{x_R - x_e}{x_R - x_L}\Big)^2 + \Big(\frac{x_L - x_e}{x_R - x_L}\Big)^2} \tag{6.8}$$

Bei typischen Verfahrstrecken von 2 m und einem Abstand der Fenster von ± 500 mm von der Mitte kann man einen mittleren Wert von σ_{y_e} berechnen:

$$\begin{aligned} \overline{\sigma_{y_e}} &= \frac{\sigma_{y_L}}{2} \int_0^2 \sqrt{(1.5 - x_e)^2 + (0.5 - x_e)^2}\, dx_e \;= \\ &= \frac{\sigma_{y_L}}{2} \Big(\frac{\sqrt{10}}{2} + \frac{\sqrt{2}}{4} ln\big(2 + \sqrt{5}\big)\Big) \;\approx 1.05 \cdot \sigma_{y_L} \end{aligned} \tag{6.9}$$

$$\Rightarrow \overline{\sigma_{y_e}} = 12.0\ \mu\mathrm{m} \tag{6.10}$$

6.5.3 Extrapolationsfehler der verschiedenen Drahtrahmen

Aus dem Fehler der Höhenmessung und der bekannten Wiederholgenauigkeit der oberen und unteren Messung ist es möglich, den Fehler der Drahtpositionen in der Höhe der Positionsstifte zu berechnen. Dieser Fehler entspricht der absoluten Meßgenauigkeit des Drahtvermessungssystems. Analog zur Extrapolation des y–Werts der Höhenmessung lautet die Extrapolation auf den x–Wert der Drahtpositionen (vgl. Abb. 6.18):

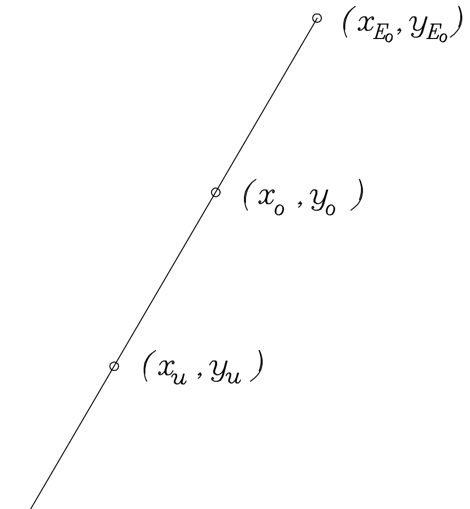

Abb. 6.18: *Erläuterung der in der Extrapolationsrechnung verwendeten Variablen. Hierbei ist $y_{E_{o/u}}$ die y–Koordinate der Positionsstifte am oberen bzw. unteren Rand. $x_{E_{o/u}}$ ist die x–Kordinate, die berechnet werden soll und $(x_{o/u}, y_{o/u})$ sind die gemessenen Koordinaten der Drähte in den Einstellungen (oben/unten).*

$$x_E = x_O + \frac{y_E - y_O}{y_O - y_U} \cdot (x_O - x_U) \tag{6.11}$$

Diese Geradengleichung beschreibt die Lage eines Drahts. Mit ihrer Hilfe kann auf seine x–Koordinate in der Höhe der POM–Stifte extrapoliert werden und der Meßfehler der errechneten x–Position ermittelt werden:

$$\sigma_{x_E} = \sqrt{(\frac{\partial x_E}{\partial x_O}\sigma_{x_O})^2 + (\frac{\partial x_E}{\partial x_U}\sigma_{x_U})^2 + (\frac{\partial x_E}{\partial y_O}\sigma_{y_O})^2 + (\frac{\partial x_E}{\partial y_U}\sigma_{y_U})^2} \tag{6.12}$$

Aus Gleichung 6.12 erhält man durch Einsetzen der Wiederholgenauigkeit ($\sigma_x = 11.5\ \mu$m) und dem in Kapitel 6.5.2 berechneten mittleren Höhenfehler ($\sigma_y = 12\ \mu$m) die absolute Meßgenauigkeit der Apparatur:

$$\sigma_X = 12.6\,\mu\text{m}\ \ (\text{X–Rahmen}) \tag{6.13}$$
$$\sigma_{UV} = 26.9\,\mu\text{m}\ \ (\text{U/V–Rahmen}) \tag{6.14}$$

Die Werte für X– und U/V–Rahmen weichen voneinander ab, da die Meßpunkte in den U/V–Rahmen viel weiter von den Positionsstiften entfernt sind und deswegen die Extrapolation für U/V–Drähte wesentlich ungenauer ist. Die Ursache hierfür liegt in der Tatsache, daß die Randdrähte der U/V–Rahmen in den Ecken vom Stahlrahmen verdeckt werden, so daß für Rahmen mit geneigten Drähten die Meßgeraden näher zusammen liegen müssen.
Außerdem gehen für U/V–Drähte die Fehler der Geradengleichung zur Bestimmung der y–Position der Drahtmeßpunkte mit ein (vgl. Kap. 6.5.2), wohingegen sie bei X–Rahmen vernachlässigt werden können.

Diese Ergebnisse belegen, daß es gelungen ist, ein Drahtvermessungssystem aufzubauen, das in der Lage ist, Drahtpositionen absolut im Raum genauer als 30 μm zu vermessen. Diese 30 μm beziehen sich auf die Endpunkte der Drähte. Im aktiven Bereich der Kammer ist die Drahtposition sogar noch genauer bekannt.

6.5.4 Berechnung der Breite der Verteilungen nach Extrapolation

Analog der Berechnung aus Kapitel 6.5.3 ist es möglich, die Breite der Verteilung der Drahtpositionen in der Höhe der Positionsstifte zu berechnen (vgl. Abb. 6.1). Darin enthalten sind die in den beiden Meßhöhen bestimmten Verteilungen der Drahtpositionen und die Geradengleichung zur Bestimmung der y–Koordinaten.

a.) Berechnung von σ_E für X–Rahmen
$y_{E_O} = -75$ mm $y_O = -100$ mm $\sigma_{x_O} = 19.3\ \mu$m $\sigma_{y_O} = 12\ \mu$m
$y_{E_U} = -605$ mm $y_U = -580$ mm $\sigma_{x_U} = 18.1\ \mu$m $\sigma_{y_U} = 12\ \mu$m
$|x_O - x_U| \approx 0$

$$\Rightarrow \sigma_{E_O} = 20.3\ \mu\text{m und } \sigma_{E_U} = 19.1\ \mu\text{m}$$

b.) Berechnung von σ_E für U–V–Rahmen

$$\begin{array}{llll} y_{E_O} = -75 \text{ mm} & y_O = -240 \text{ mm} & \sigma_{x_O} = 19.7\ \mu\text{m} & \sigma_{y_O} = 12\ \mu\text{m} \\ y_{E_U} = -605 \text{ mm} & y_U = -440 \text{ mm} & \sigma_{x_U} = 19.9\ \mu\text{m} & \sigma_{y_U} = 12\ \mu\text{m} \\ |x_O - x_U| = 115 \text{ mm} & & & \end{array}$$

$$\Rightarrow \sigma_{E_O} = 41.9\ \mu\text{m und } \sigma_{E_U} = 42.1\ \mu\text{m}$$

Vergleicht man die berechnete Breite der Verteilungen für X– und U/V–Rahmen mit den gemessenen Daten aus Kapitel 6.3.3 und 6.4, so zeigt sich eine große Übereinstimmung, die auf eine geringe Korrelation der Verteilungen in den beiden Meßhöhen schließen läßt.

6.6 Kontrollmessung mit einem Laser

Die Korrektur der systematischen Fehler ist nur dann zulässig, wenn man sicher ist, daß keine systematischen Herstellungsfehler an den Drahtrahmen vorhanden sind. Diese Herstellungsfehler würden dann zusammen mit allen anderen systematischen Fehlern korrigiert werden und könnten nicht gemessen werden. Es ist folglich notwendig nachzuweisen, daß die Ursache der Fehler bei der Meßapparatur liegt. Solche systematischen Fehler können zum Beispiel durch Winkelverkippungen der Lineareinheit verursacht werden, die zu Falschmessungen führen. In Abbildung 6.19 zeigt sich, daß die Größe des Meßfehlers proportional zum Tangens der Winkelverkippung ist:

$$\Delta x = \tan\alpha \cdot d = \tan\alpha \cdot 250 \text{ mm} \tag{6.15}$$

Somit verursacht schon eine sehr kleine Winkelverkippung von 0.01° eine Fehlmessung der Drahtposition um 44 μm. Solche Winkelverkippungen können jedoch nachträglich mit einer Laservermessung nachgewiesen werden.

6.6.1 Aufbau der Laservermessung

Für die Vermessung der Winkelverkippungen wurde das gleiche Laserdioden–Kollimator–Modul als Laser eingesetzt wie auch bei der Drahtvermessung. Die Mikrofokusoptik wurde aber durch eine Lochblende mit einem Durchmesser von 1 mm ersetzt, so daß ein kleiner runder Laserstrahl zur Verfügung stand, dessen Position leicht bestimmt werden konnte. Dieser Laser wurde so auf dem Verfahrtisch montiert, daß er exakt parallel zu der Lineareinheit ausgerichtet war. Über Spiegel wurde dann der Laserstrahl in ca. 10 m Entfernung auf einen Schirm abgebildet, wobei mit Hilfe eines möglichst großen Hebelarms die Messung auch kleiner Winkelschwankungen ermöglicht wurde. Auf dem Schirm wurde die jeweilige Laserposition auf ± 0.5 mm genau bestimmt (vgl. Abb. 6.20).

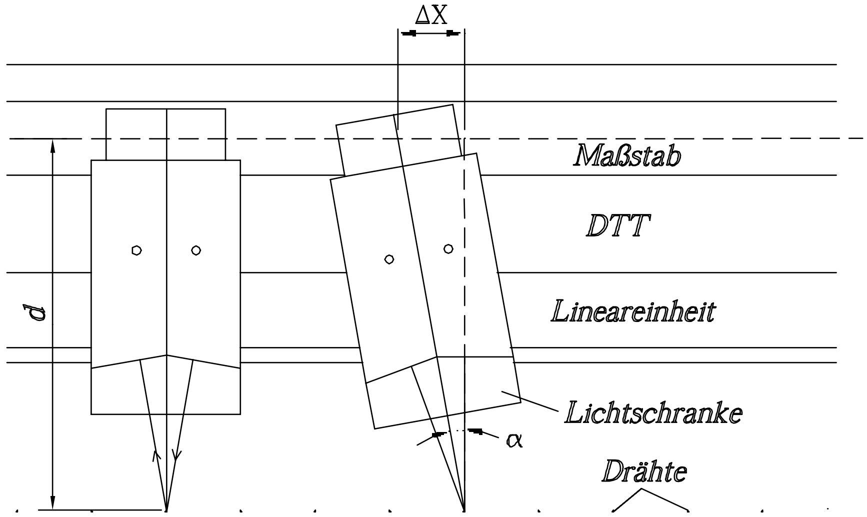

Abb. 6.19: *Berechnung des systematischen Fehlers bei einer Winkelverkippung. Hierbei ist der effektive Abstand zwischen Drahtebene und Maßstab $d = 250$ mm.*

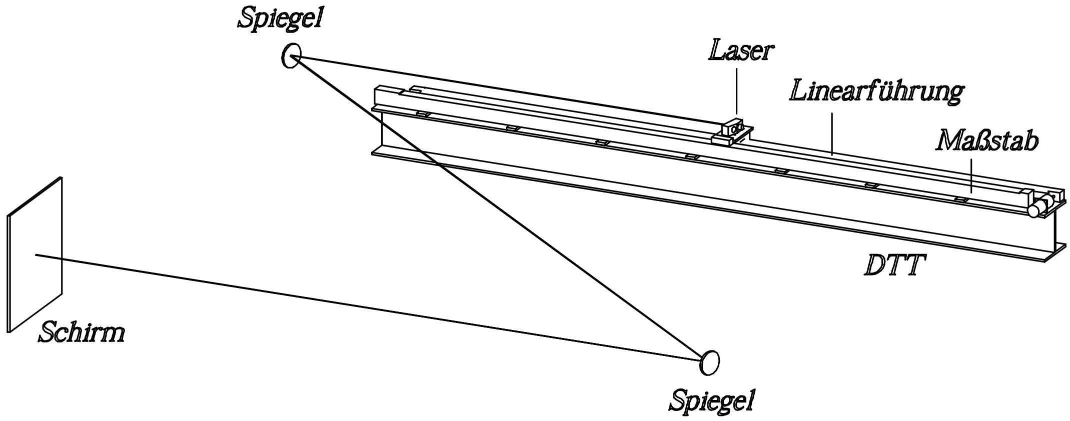

Abb. 6.20: *Meßaufbau der Laservermessung.*

6.6.2 Ergebnisse der Laservermessung

Fährt man den Laser in kleinen Schritten von je 30 mm über die Lineareinheit, so ist eine Veränderung der horizontalen Laserposition auf dem Schirm zu beobachten (vgl. Abb. 6.21).

Diese Veränderung der Position kann in Winkelverkippungen umgerechnet werden, unter Berücksichtigung des veränderlichen Abstands l zwischen Laser und Schirm:

$$\alpha = arctan(\frac{\triangle x}{l}) \qquad (6.16)$$

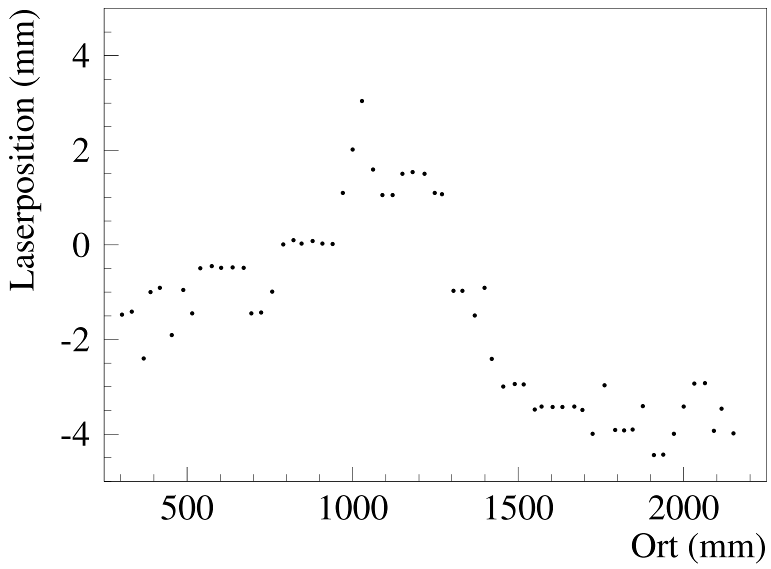

Abb. 6.21: *Ortsveränderung der horizontalen Laserposition bei der nachträglichen Vermessung der Winkelverkippungen.*

Hierbei ist $\triangle x$ die gemessene Laserpositionsänderung.

Aus der Winkelverkippung kann anschließend der erwartete systematische Fehler F berechnet werden, in den der Abstand d des Metallbandmaßstabes von der Drahtebene mit eingeht (vgl. Abb. 6.19).

$$\frac{F}{d} = \frac{\triangle x}{l} \tag{6.17}$$

$$\Rightarrow F = \frac{\triangle x}{l} \cdot 250 \text{ mm} \tag{6.18}$$

In Abbildung 6.22 sind die anhand der gemessenen Winkelverkippungen erwarteten systematischen Fehler aufgetragen.

Dabei wurde als Referenz der erste Meßpunkt gewählt, indem an seiner Position ein Meßfehler von 0 definiert wird und die berechneten Meßfehler relativ zu diesem ersten Wert angegeben werden. Diese aus der Laservermessung berechneten systematischen Fehler können mit jenen aus der Vermessung der Drahtrahmen verglichen werden (vgl. Abb. 6.22).

Es zeigt sich sehr deutlich, daß sowohl die Tendenz als auch die Größenordnung der systematischen Fehler auf den Winkelverkippungen der Lineareinheit beruhen. Folglich ist die Durchführung systematischer Korrekturen, wie in Kapitel 6.3.2 beschrieben, gerechtfertigt.

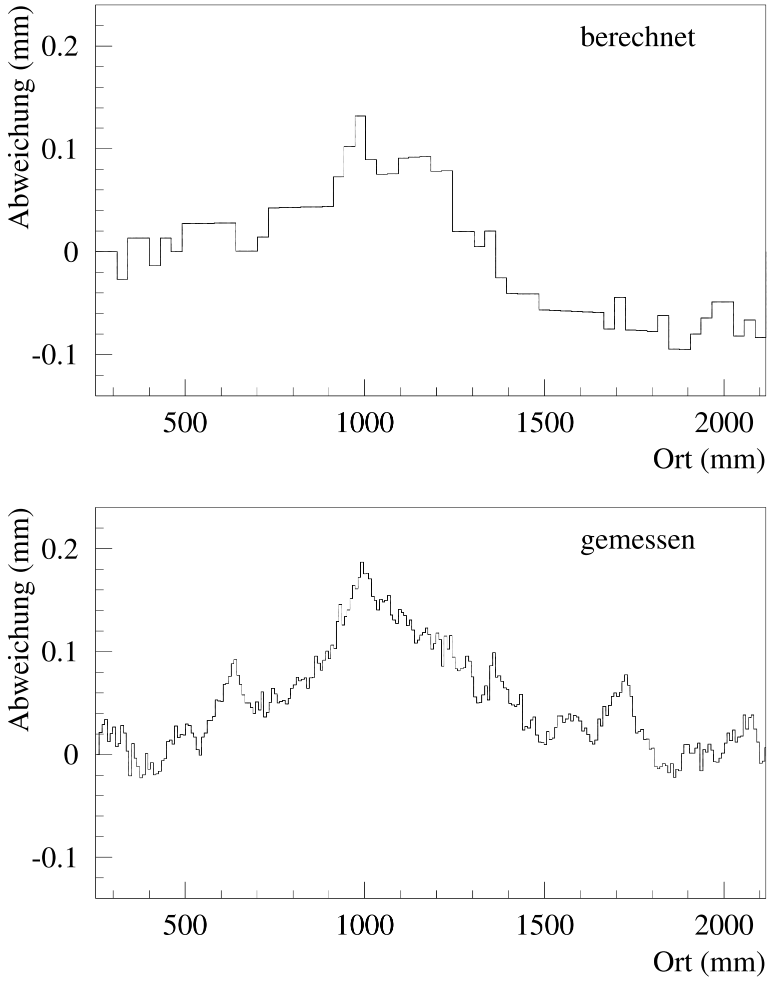

Abb. 6.22: *Vergleich zwischen den aus der Laservermessung berechneten und den aus der Drahtvermessung erhaltenen systematischen Fehlern.*

7 Zusammenfassung

Hauptziel des HERMES–Experiments ist es, die spinabhängigen Strukturfunktionen $g_1(x, Q^2)$ und $g_2(x, Q^2)$ in einem kinematischen Bereich von 1 $\mathrm{GeV}^2 < \mathrm{Q}^2 < 20\ \mathrm{GeV}^2$ und $0.02 < \mathrm{x} < 0.8$ zu messen. Hierbei sollen die Messungen mit sehr geringen statistischen und systematischen Fehlern erfolgen.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde zur Minimierung der systematischen Fehler in der Ortsbestimmung ein Drahtvermessungsystem für die hinteren HERMES–Driftkammern aufgebaut, das es ermöglicht, die Drahtpositionen absolut im Raum mit einer Genauigkeit von 30 μm zu bestimmen.

Mit diesem Drahtvermessungssystem wurden sämtliche Drahtrahmen vor dem Zusammenbau der Kammern vermessen und auf eventuelle Fehlpositionen der Drähte überprüft. Dazu wurden die Drähte mit einer Reflexionslichtschranke detektiert und mit Hilfe eines damit fest verbundenen Metallbandmaßstabs konnte die aktuelle Position bestimmt werden. Diese kann über ein Datennahmesystem mit einem Rechner ausgelesen werden, so daß die erhaltenen Drahtpositionen in Datenfiles abgespeichert werden können. Mittels einer exakt gefertigten und auf 5 μm/m genau vermessenen Eichplatte gelingt es, diese eindimensionalen Meßergebnisse in zweidimensionale Koordinaten umzurechnen. Durch eine Vermessung in zwei verschiedenen Höhen der Drahtrahmen erhält man die absoluten Positionen der Drähte, die anschließend mit ihren in der Konstruktion vorgegebenen Positionen verglichen werden.

Es zeigt sich, daß sowohl die relativen als auch die absoluten Abweichungen der Drahtpositionen im Koordinatensystem der Driftkammer im Bereich von 20 μm liegen. Dies bedeutet einerseits, daß die vom Hersteller geforderten Toleranzen eingehalten wurden. Andererseits zeigt es aber auch, daß die Positionsvorgabe der Drähte durch Paßstifte die erforderliche Genauigkeit gewährleistet.

Weiterhin ermöglicht dieses System eine relative Messung bezüglich äußerer Meßmarken, mit deren Hilfe der gesamte HERMES–Detektor genau vermessen und während des laufenden Experiments auf zeitliche Änderungen hin überwacht werden soll.

Bei den Messungen traten systematische Fehler auf, die jedoch korrigiert werden konnten. Dies war möglich, da mit einem zusätzlichen Aufbau gezeigt wurde, daß sämtliche systematische Fehler aus Nichtlinearitäten des Drahtvermessungssystems resultierten. An den Drahtrahmen selbst wurden keine systematischen Fehler festgestellt.

Die aus der Messung erhaltenen Daten wurden in ein Format umgewandelt, das mit der Analysesoftware des HERMES–Experiments kompatibel ist. Somit besteht die Möglichkeit, die exakt gemessenen Drahtpositionen der Driftkammern in die Analyse der Daten mit einzubeziehen, um eventuelle Fehlpositionen von Driftkammerdrähten zu korrigieren. Damit ermöglicht die in dieser Arbeit entwickelte Apparatur die systematischen Fehler, die durch Fehlpositionierung der Drähte verursacht werden, entscheidend zu minimieren.

A Anhang

A.1 Längenmeßsystem

A.1.1 Metallbandmaßstab

Der Metallbandmaßstab LB326 (vgl. Tab. A.1) der Firma Heidenhain arbeitet nach dem Prinzip der photoelektrischen Abtastung sehr feiner Gold–Striche, die eine Teilungsperiode von 100 μm haben. Die Abtasteinheit umfaßt eine Lichtquelle, einen Kondensor, der die Lichtstrahlen parallel ausrichtet, die Abtastplatte mit dem Abtastgitter und Photoelemente (vgl. Abb. A.1). Bei einer Bewegung der Abtasteinheit relativ zum Maßstab kommen die Striche und Lücken des Maßstabs abwechselnd mit denen der Abtastgitter zur Deckung. Die Photoelemente setzen die sich periodisch ändernde Lichtintensität in elektrische Signale um, aus denen auf die Ortsveränderung zurückgerechnet werden kann. Zusätzlich sind mehrere Referenzmarken auf dem Metallband angebracht, mit deren Hilfe ein absoluter Bezugspunkt definiert werden kann [Hei 92].

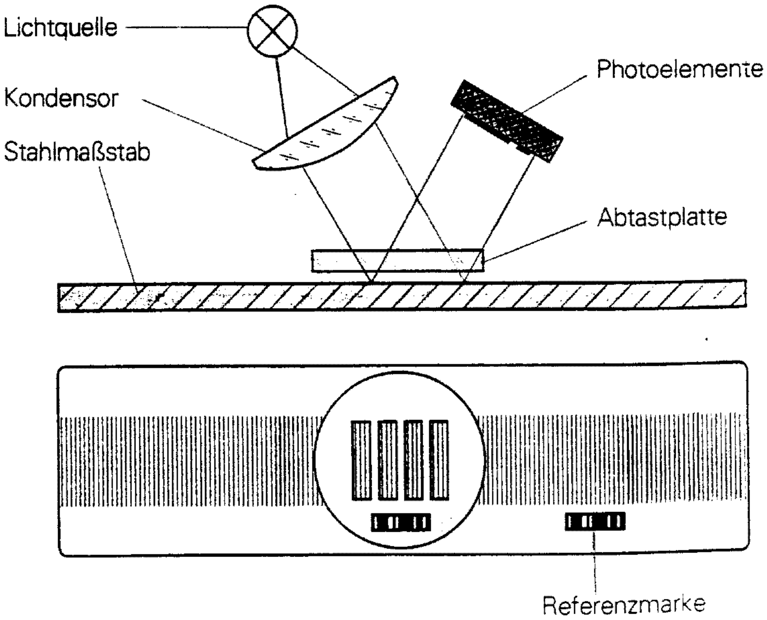

Abb. A.1: *Photoelektrisches Meßprinzip des Metallbandmaßstabs.*

Tab. A.1: *Technische Daten des Metallbandmaßstabs LB*326.

Hersteller:	Heidenhain
Typ:	LB326
Teilungsperiode	100 μm
Genauigkeitsklasse:	5 μm/m
Meßlänge:	2640 mm
max. Verfahrgeschwindigkeit:	60 m/min
Lichtquelle:	LED
Betriebstemperatur:	0 – 50°C
Thermischer Längenausdehnungs–Koeffizient:	$\alpha_{\text{therm.}} = 10 \cdot 10^{-6}\text{K}^{-1}$

A.1.2 Positionsanzeige

Die elektrischen Ausgangssignale des Metallbandmaßstabs werden von der Positionsanzeige VRZ 404 in Verfahrwege umgerechnet. Diese Positionsanzeige wurde vom Hersteller so abgeändert, daß sich in Verbindung mit dem Meßsystem LB326 eine Auflösung von 1 μm ergibt. Ihre technischen Daten sind in Tabelle A.2 zusammengefaßt.

Tab. A.2: *Technische Daten der Positionsanzeige VRZ* 404.

Hersteller:	SMD–Technik
Typ:	VRZ404
Anzahl der Achsen:	1
Anzeigenschritte:	1 μm
Schnittstelle:	GPIB
Arbeitstemperatur:	0 – 45°C

A.2 Laserdioden–Kollimatorsystem und Stromversorgung

Das Laserdioden–Kollimatorsystem der Firma Schäfter & Kirchhoff setzt sich aus einer Laserdiode HL6712G (vgl. Tab. A.3) und einen Objektiv–Triplett zusammen. Die zugehörige Stromversorgung, die Regelplatine SK9710 der Firma Schäfter & Kirchhoff, kann mit einem externen TTL–Pegel zwischen 0 und 50 kHz moduliert werden, wodurch eine Amplitudenmodulation des Lasers ermöglicht wird.

Tab. A.3: *Technische Daten der Laserdiode.*

Hersteller:	Hitachi
Typ:	HL6712G
max. Ausgangsleistung:	5 mW
Wellenlänge:	670 nm
Spektrale Eigenschaft:	Singlemode
Divergenz $\theta_{\|\|}$ / $\theta_{\perp}$ (Deg.)	8 / 28
Astigmatismus $\triangle Z/\mu$m	5

A.3 Datennahmesystem

Das in Erlangen verwendete Datennahmesystem wurde in Kapitel 5.7 erläutert. Zur besseren Übersicht sind hier sämtliche verwendete Komponenten in Tabelle A.4 zusammengefaßt.

Tab. A.4: *In dem Erlanger Datennahmesystem verwendete Module.*

Funktion	Kurzbezeichnung	Hersteller
Hostrechner	DEC Station 5000/240	Digital
FASTBUS–Master	STR330/CHI	Struck
FASTBUS–SCSI–Interface	STR330/SCSI	Struck
FASTBUS–nach–VSB–Interface	STR330/VSB2	Struck
CAMAC–Branch–Driver	FBD STR320	Struck
CAMAC–Crate–Controller	CCA1	Hytec
GPIB–Interface	3388–G1A	Kinetic System Corporation
Schrittmotorsteuerung	SMC24B	Joerger

A.4 Ausleseelektronik

Alle Module der Ausleseelektronik, mit Ausnahme des Photosensors, sind in NIM–Gehäusen eingebaut und befinden sich in der Nähe des Drahtvermessungssystems in einem NIM–Crate, um die Kabellängen zu minimieren. Der Photosensor hingegen ist in einem Aluminiumzylinder in der Reflexionslichtschranke montiert und bezieht seine Versorgungsspannung extern von dem dafür vorgesehenen Anschluß in dem Einschub der Totzeitschaltung. In Abbildung A.3 – A.6 sind sämtliche Schaltpläne der Module dargestellt.

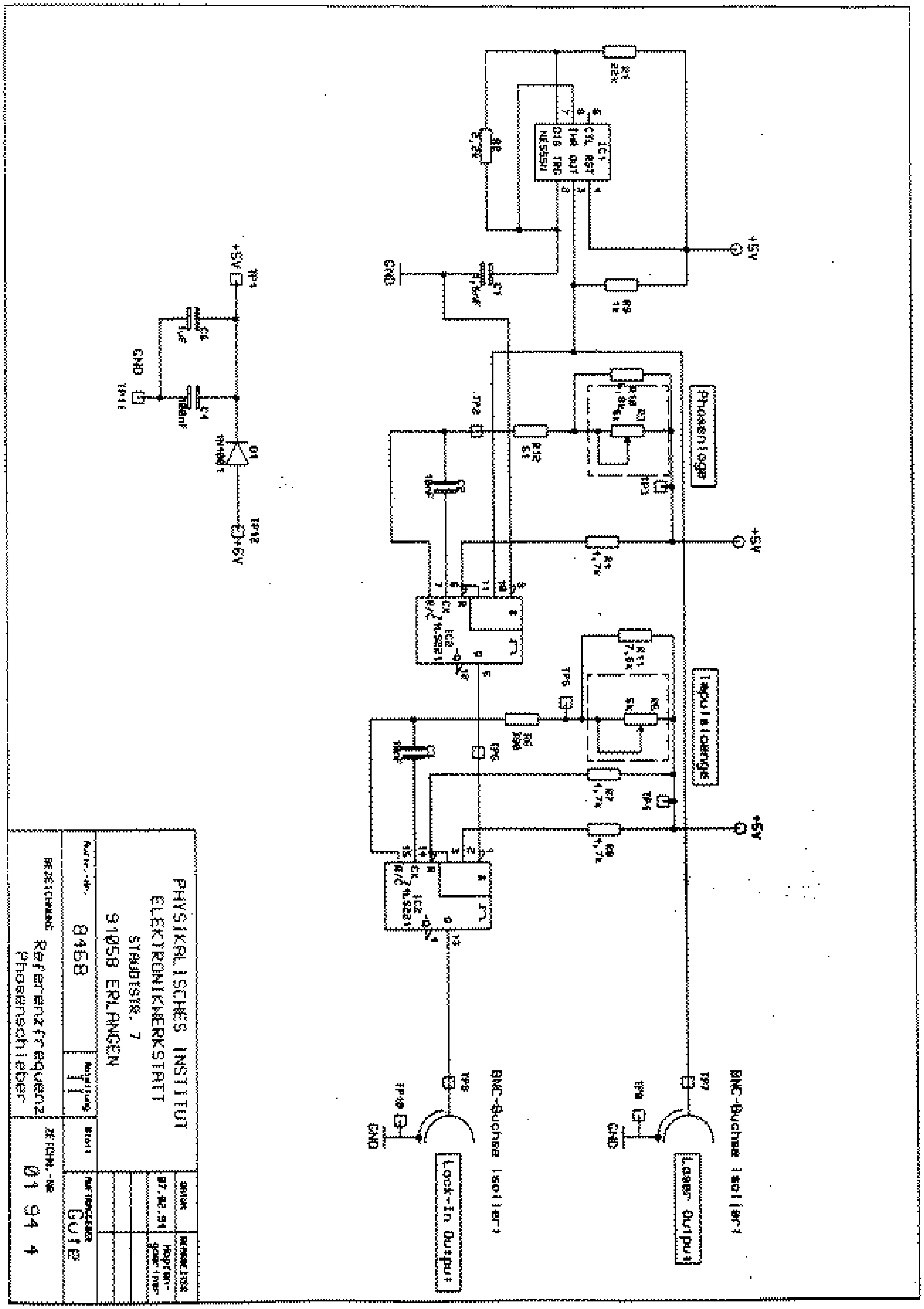

Abb. A.2: *Aufbau des Referenzfrequenzgebers.*

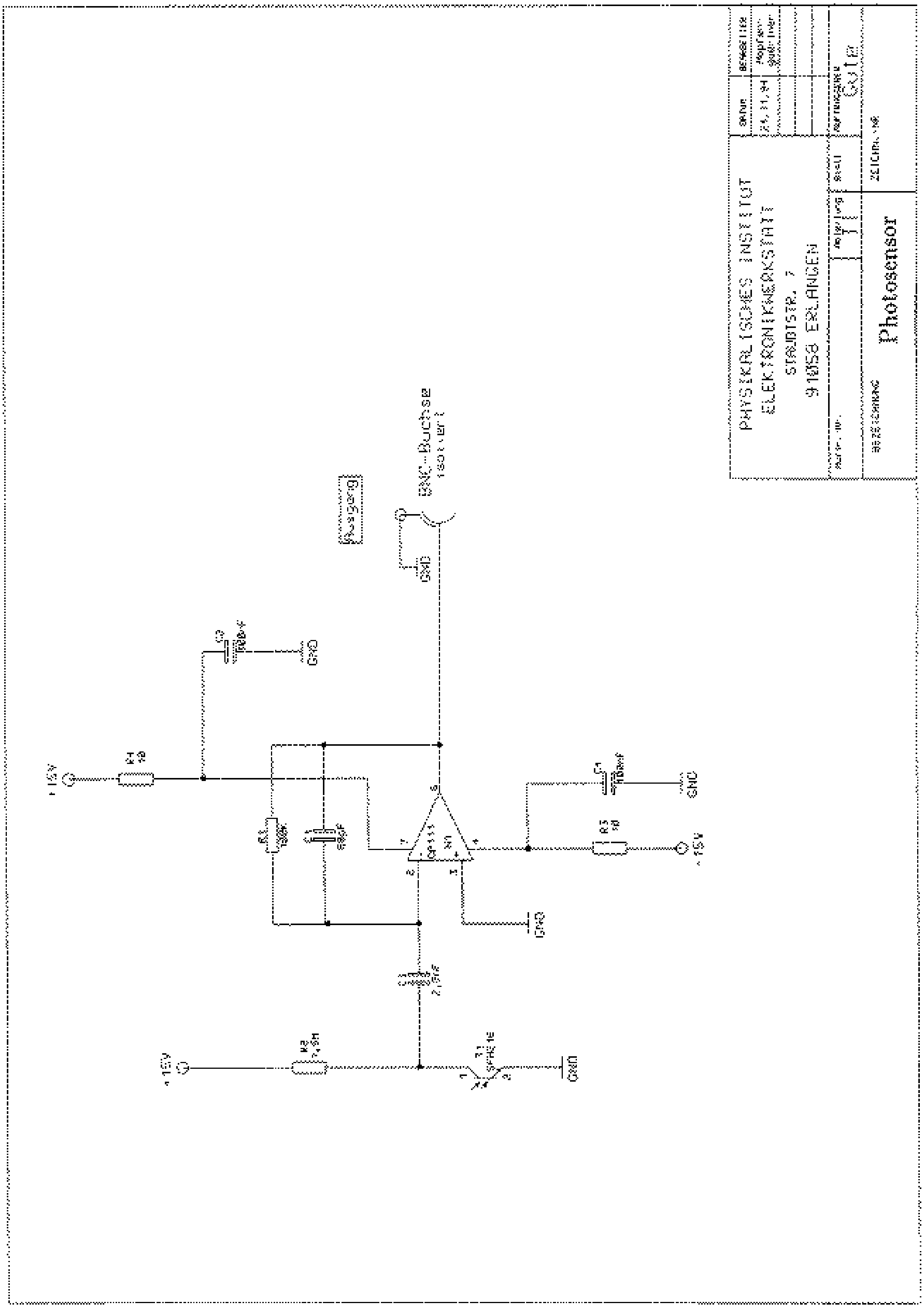

Abb. A.3: *Aufbau des Photosensors.*

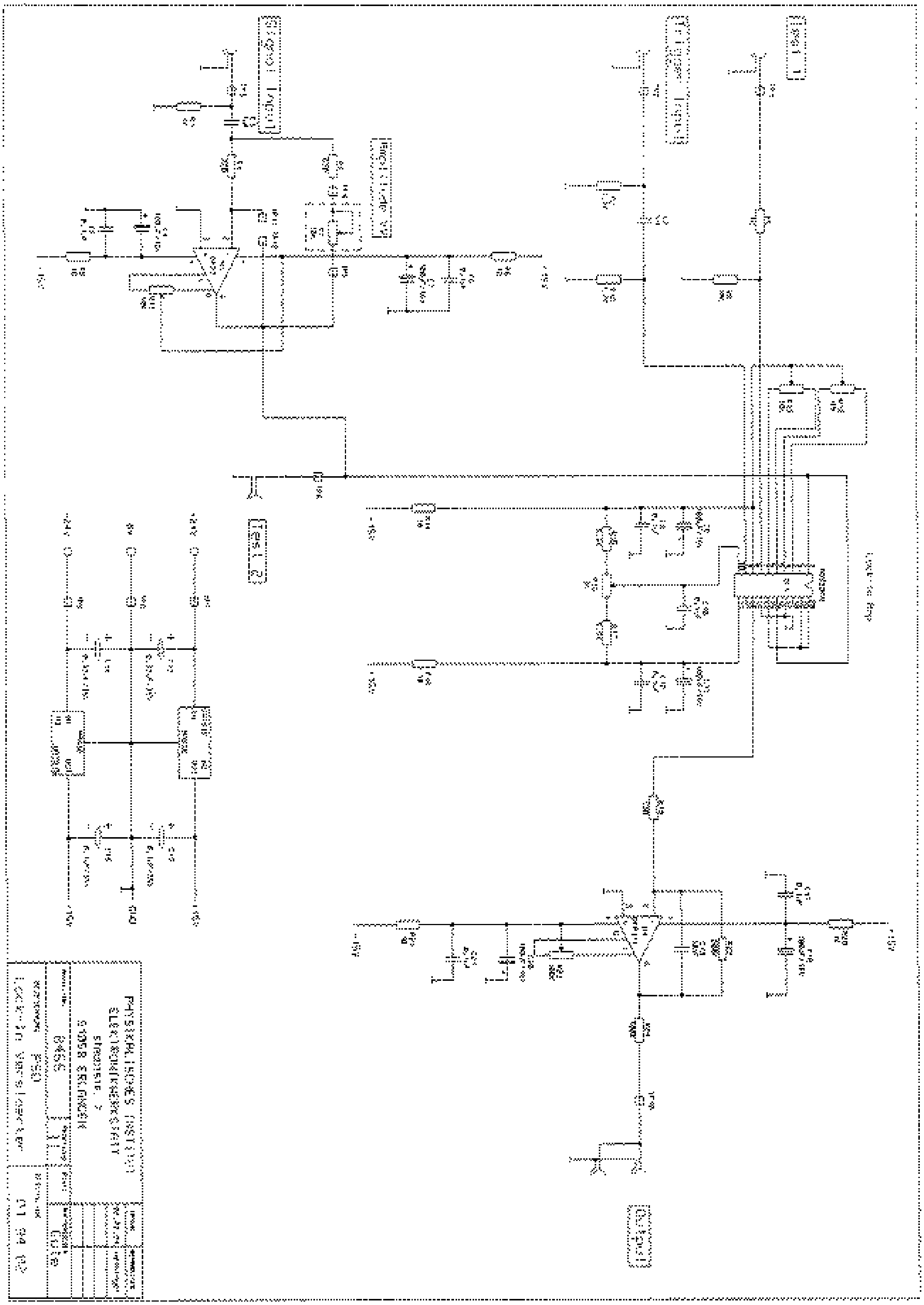

Abb. A.4: *Aufbau des Lock–in–Verstärkers.*

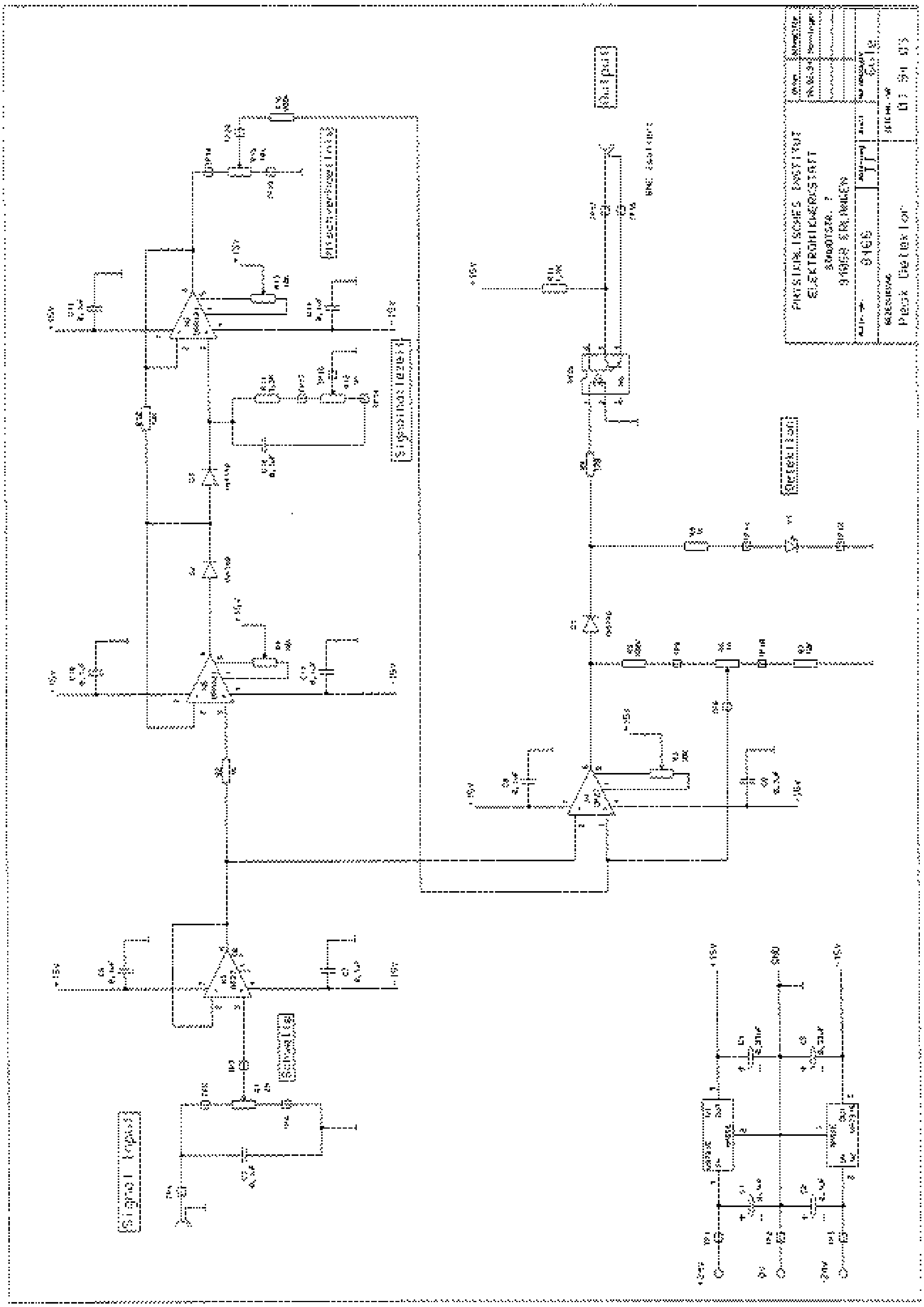

Abb. A.5: *Aufbau des Peak–Detektors.*

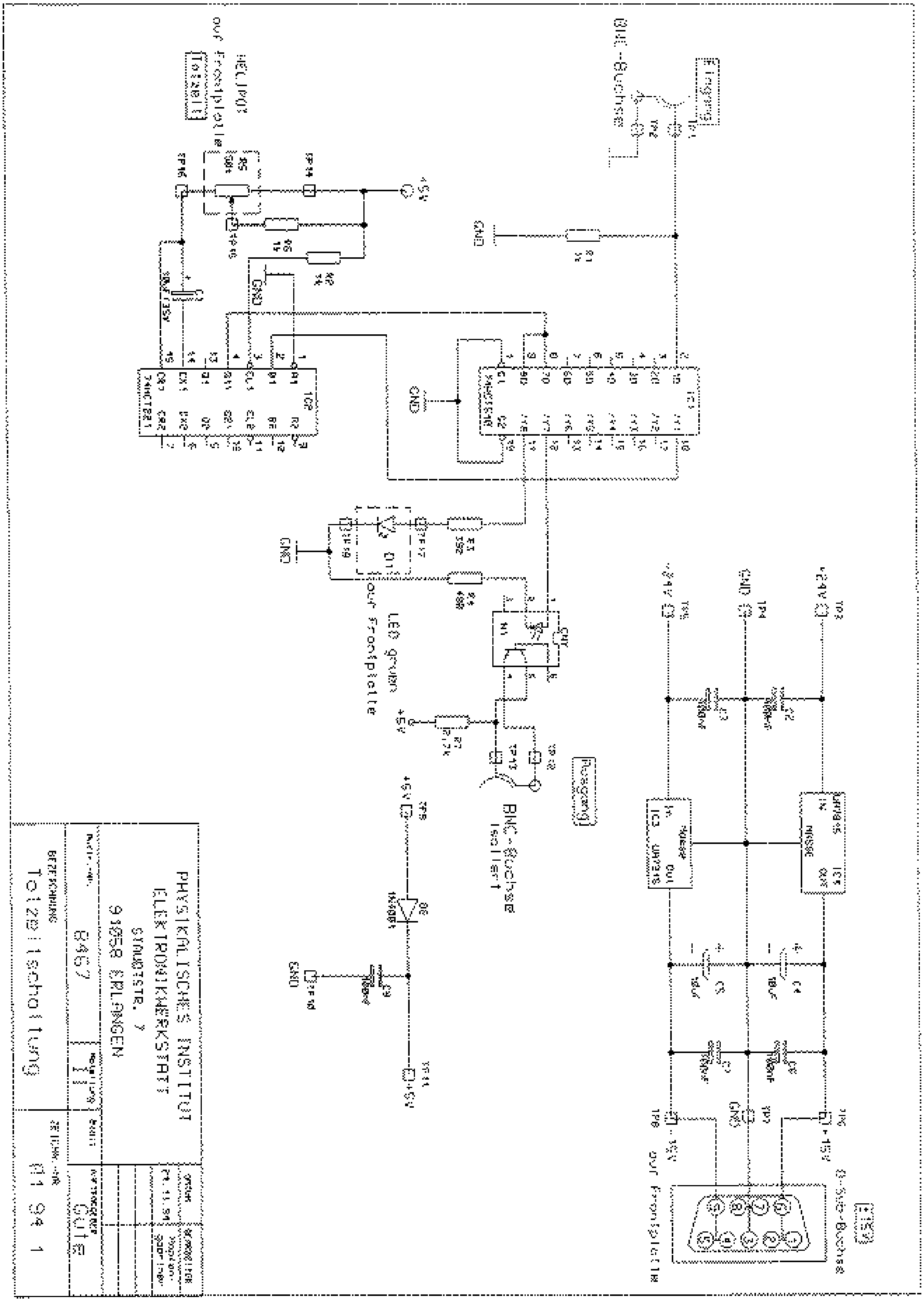

Abb. A.6: *Aufbau der Totzeitschaltung.*

Literaturverzeichnis

[Abe 94] K. Abe et al., **SLAC–PUB–6508**, Aug. 1994.

[Ade 93] B. Adeva et al., Phys. Lett. **B 302** (1993) 533.

[Ant 93] D. L. Anthony et al., Phys. Rev. Lett. **71** (1993) 959.

[Bar 94] D.P. Barber et al., **DESY-94-171**, (1994).

[Bec 93] U. Becker, persönliche Mitteilung.

[Bet 30] H.A. Bethe, Ann. d. Phys. **5** (1930) 325.

[Bjo 66] J. D. Bjorken, Phys. Rev. **148** (1966) 1457, **D1** (1970) 1367.

[Blu 93] W. Blum and L. Rolandi, *Particle Detection with Drift Chambers*, Springer–Verlag Berlin 1993.

[Bur 76] H. Burkhardt and W. N. Cottingham, Ann. of Phys. **56** (1970) 453.

[CAM 72] ESONE Commitee, Commission of the European Community, EUR 4100e, 1972.

[Cha 68] G. Charpak et al., Nucl. Instr. & Meth. **62** (1968) 262.

[Cha 70] G. Charpak et al., Nucl. Instr. & Meth. **80** (1970) 13 .

[Ell 74] J. Ellis and R. L. Jaffe, Phys. Rev. **D9** (1974) 1444.

[FAS 86] Standard FASTBUS Modular High–Speed Data Aquisition and Control System ANSI/IEEE Std 960–1986.

[Eic 91] E. J. Eichten, I. Hinchliffe and C. Quigg, **Fermilab–Pub–91/272**.

[Hei 92] Heidenhain Katalog, *NC–Längenmeßsysteme*, 1992.

[HER 90] The HERMES Collaboration: *A Proposal to Measure the Spin–Dependent Structure Functions of the Neutron and the Proton at HERA.* DESY–PRC 90/01, 1990.

[HER 93] The HERMES Collaboration: *Technical Design Report*. DESY–PRC 93/06, MPIH–V20–1993, 1993.

[Hoo 89] P. Hoodbhoy, R.L. Jaffe and A. Manohar, Nucl. Phys. **B312** (1989) 571.

[Hor 89] P. Horowitz and W. Hill, *The arts of electronics* (2nd ed.) Cambridge University Press, Cambridge, 1990.

[Jaf 90] R.L. Jaffe and A. Manohar, Nucl. Phys. **B337** (1990) 509.

[Jaf 89a] R.L. Jaffe and A. Manohar, Phys. Lett. **B223** (1989) 218.

[Jaf 89b] R.L. Jaffe and A. Manohar, Nucl. Phys. **B321** (1989) 343.

[Kod 79] J. Kodaira et al., Nucl. Phys. **B159** (1979) 99.

[Kod 80] J. Kodaira, Nucl. Phys. **B165** (1980) 129.

[Kro 94] H. Kroha, ATLAS Internal Note **MUON–NO–058** (1994).

[Leo 94] W. R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, 2. überarbeitete Auflage, Springer–Verlag Berlin 1994.

[Mau 93] R. W. Maurer, Diplomarbeit, Universiät Mainz.

[Mil 93] A. Miller, persönliche Mitteilung.

[Mon 94] L. Montanet et al., Phys. Lett. **B 329** (1994) 399.

[Oh 93] S. H. Oh et al., Nucl. Instr. & Meth. **A325** (1993) 142.

[Tow 47] J. Townsend, *Electrons in Gases*, Hutchinson, London (1947).

[VME 87] The VMEbus Specification, ANSI IEEE Std 1014–1987.

[Wal 71] A. H. Walenta et al., Nucl. Instr. & Meth. **92** (1971) 373.

Danksagung

Danken möchte ich allen, die mich bei der Anfertigung dieser Diplomarbeit unterstützt haben:

- Insbesondere H. Prof. Dr. Klaus Rith für die Vergabe dieser Diplomarbeit und seine kompetenten Tips bei schwierigen Problemen. Besonders angenehm war die weitgehende Freiheit in der Realisierung eigener Ideen und die Möglichkeit Erfahrungen, auch in Gebieten über das eigentliche Thema der Arbeit hinaus, zu sammeln.

- Ganz herzlich meinem Betreuer Frank Neunreither, der das Gelingen dieser Arbeit stets durch produktive Hilfestellungen förderte.

- Der mechanischen Werkstatt des Physikalischen Instituts, unter Leitung von H. Muhr und H. Heimpel, für die immer verläßliche, tatkräftige Hilfe bei oftmals leider sehr kurzfristigen Aufträgen.

- Der elektronischen Werkstatt des Physikalischen Instituts unter Leitung von H. Merkel.

- Der gesamten Erlanger Gruppe für das angenehme Arbeitsklima und die vielen kleinen Ratschläge, die oft zur Problemlösung beigetragen haben. Insbesondere Thomas, den ich sehr zu schätzen gelernt habe, nicht nur wegen seiner profunden Kenntnisse in der Interpunktion sondern vielmehr wegen seiner stets hilfsbereiten und verläßlichen Art, und Matthias für seine spontane Hilfe bei den Rechnerproblemen des Alltags und darüber hinaus.

- Der Hamburger Crew und dabei ganz besonders Carsten, die aus den vielen DESY Aufenthalten mehr als nur arbeitsreiche Meetings machten.

- Der ganzen Zeuthener Gruppe für die gute Zusammenarbeit und die engagierten Hilfestellungen bei aktuellen Fragen.

- Kristin und Ilse für den germanistischen Feinschliff dieser Arbeit.

- Meinen Eltern für die Unterstützung jeglicher Art.

- Meiner Freundin Marion, die mir die arbeitsreiche Zeit durch Verständnis und Motivation um vieles einfacher gestaltete.

Diese Arbeit wurde im Rahmen des HERMES–Projekts teilweise aus Mitteln des BMFT unter der Förderungsnummer 05 6ER 12 I 3 finanziert.

Hiermit erkläre ich, daß ich diese Arbeit selbständig verfaßt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Erlangen, den 15. Dezember 1994

Andreas Gute