

II. Institut für Experimentalphysik der Universität Hamburg

Aufbau und Test einer Apparatur zur
Bestimmung der mechanischen
Drahtspannung in Driftkammern

Diplomarbeit
von
Andreas Runge

Hamburg, den 5. November 1989

Inhalt

Einführung und Aufgabenstellung	3
1 HERA und der H1-Detektor	4
1.1 Der HERA-Speicherring	4
1.2 Erwartete Physik bei HERA	5
1.3 Der H1-Detektor	7
2 Physik der Driftkammer	10
2.1 Funktionsweise von Driftkammern	10
2.2 Die Jetkammern CJC1 und CJC2	12
3 Anforderungen an Meßverfahren	16
3.1 Beschreibung des Spannverfahrens	16
3.2 Präzision	16
3.3 Zeitaufwand für eine Messung	18
3.4 Bedienung	18
4 Verfahren zur Messung mechanischer Drahtspannungen	20
4.1 Anregung mechanischer Schwingungen	20
4.2 Bestimmung der Resonanzfrequenz	21
4.3 Vergleich der möglichen Verfahren	22
4.4 Das RHW -Verfahren	23
4.4.1 Meßprinzip	23
4.4.2 Thermische Korrekturen	24
5 Wire Tension Box II	27
5.1 Systemaufbau	27
5.2 Die Meßeinheit WTB II/a	28
5.3 Die Kontrolleinheit WTB II/b	29
5.4 Die Relaisbox WTB II/c	32
6 Das Kontrollprogramm WTB 5.0	37
6.1 Bedienung und Kommandointerpreter	37
6.2 Ablauf einer Einzelmessung	39
6.3 Ablauf einer Messung mehrerer Drähte	40
6.4 Auffinden der Resonanzfrequenz	41

7 Fehlerabschätzung	44
7.1 Systematische Fehler von Hard- und Software	44
7.2 Statistische Fehler bei der Messung	45
7.3 Systematische Fehler durch die Materialparameter	46
8 Testmessungen	47
8.1 Testmessungen am Full-Size-Prototyp	47
8.2 Testmessungen am Geometriemodell	51
9 Zusammenfassung	54
A Differentialgleichung der schwingenden Saite	i
B Schaltbilder	iii
Abbildungsverzeichnis	xii
Tabellenverzeichnis	xii
Literaturverzeichnis	xiv

Einführung und Aufgabenstellung

Bei DESY in Hamburg befindet sich derzeit der Proton-Elektron Speicherring HERA im Bau. An ihm werden in zwei getrennten Ringen 30 GeV Elektronen mit gegenläufig kreisenden 820 GeV Protonen in vier Wechselwirkungszone zur Kollision gebracht. Die sich dabei ergebende Schwerpunktsenergie von 314 GeV übersteigt um ein Vielfaches die in FIXED-TARGET¹ Experimenten erreichbaren Energien. Durch Experimente an diesem Speicherring erhofft man sich sowohl eine Überprüfung theoretischer Modelle über die Struktur der Materie als auch eventuell die Entdeckung neuer, theoretisch vorhergesagter Teilchen.

Zunächst sind in zwei der vier Hallen von HERA Experimente für Hochenergiephysik geplant, H1 und ZEUS. Beide Detektoren bestehen im Wesentlichen aus großen elektromagnetischen und hadronischen Kalorimetern und einer Reihe von Drift-, Proportionalkammern zur Bestimmung und Rekonstruktion von Teilchenbahnen aus HERA-Ereignissen. Der zentrale Spurdetektor des H1-Detektors besteht unter anderem aus zwei großen zylindrischen Jetkammern, CJC1 und CJC2. Einer der entscheidenden Arbeitsgänge beim Bau dieser Jetkammern ist das Spannen von insgesamt 14550 Drähten im Durchmesser von 20, 127, 200 und $500\ \mu\text{m}$ auf Sollspannungen innerhalb enger Toleranzen.

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Konstruktion, den Aufbau und die Tests einer rechnergesteuerten Apparatur, mit der beim Bau der beiden zentralen Jetkammern des H1-Detektors die mechanische Spannung der Kammerdrähte gemessen und hinsichtlich der Einhaltung von Sollwerten und Toleranzen überprüft werden kann.

¹Experimente, bei denen ein Teilchenstrahl auf ein feststehendes Ziel aus Materie trifft

Kapitel 1

HERA und der H1-Detektor

Das folgende Kapitel beschreibt das Umfeld dieser Arbeit, insbesondere den HERA-Speicherring, die zu erwartenden physikalischen Ergebnisse und experimentellen Anforderungen sowie Aufbau und Arbeitsweise des H1-Detektors und seiner zentralen Driftkammern.

1.1 Der HERA-Speicherring

Zur Zeit befindet sich auf dem Gelände des Deutschen Elektronen SYNchrotrons DESY die Hadron Elektron Ring Anlage HERA im Bau. Es handelt sich dabei um zwei getrennte Speicherringe, in denen Elektronen und Protonen gegensinnig umlaufen und in vier Wechselwirkungszonen zur Kollision gebracht werden. Die vorhandenen Anlagen bei DESY werden nach teilweise Um- oder Neubau als Vorbeschleuniger eingesetzt. Der HERA-Speicherring ist in einem unterirdischen Tunnel von ca. 6.3 km Länge untergebracht. Eine besondere technologische Herausforderung des Projektes stellt das supraleitende Magnet-system für den Protonenring dar. Dieses ist notwendig, da auf andere Weise die Feldstärke von $4,65\text{ Tesla}$ nicht erreichbar sind, welche die Beschleunigung von 820 GeV Protonen auf einem Krümmungsradius von ca. 800 m erfordert. Die Inbetriebnahme des Speicherrings ist für 1990 vorgesehen.

Von den physikalischen Möglichkeiten her eröffnet HERA einen neuen kinematischen Bereich in der Hochenergiephysik. Mit der maximalen Energie von $E_e = 30\text{ GeV}$ für die Elektronen und $E_p = 820\text{ GeV}$ für die Protonen ergibt sich eine maximale Schwerpunktsenergie von $E_{cms} = 314\text{ GeV}$ bei einem maximalen Impulsübertrag von $Q_{max}^2 = 10^5\text{ GeV}^2$. Die erwartete Luminosität beträgt $L = 1.5 * 10^{31}\text{ cm}^2\text{ s}^{-1}$. Von besonderer experimenteller Bedeutung ist die Möglichkeit, den Elektronenstrahl longitudinal zu polarisieren. Dies erlaubt die Suche nach rechtshändigen Strömen.

Eine Übersicht über das Injektionsschema des HERA-Speicherrings zeigt Abbildung 1.1, während in Tabelle 1.1 die wichtigsten Parameter der HERA-Anlage zusammengefasst sind.

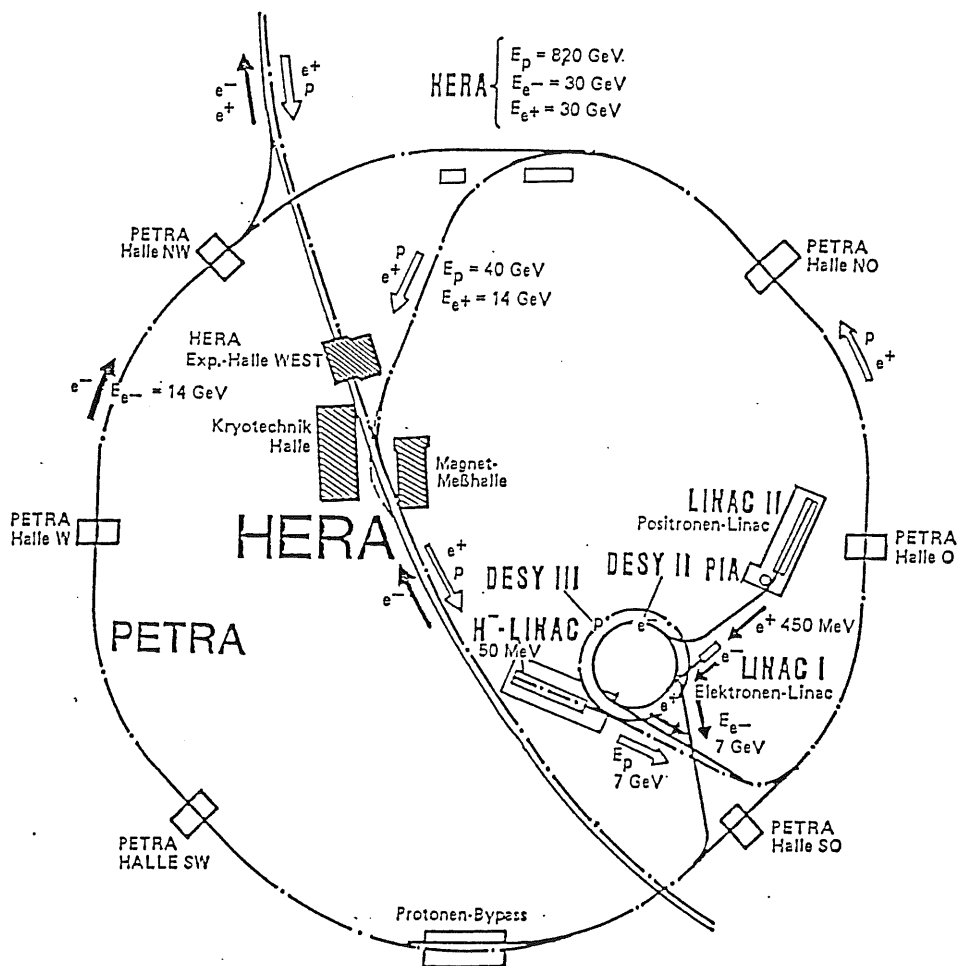


Abbildung 1.1: Injektionsschema des HERA-Speicherrings

1.2 Erwartete Physik bei HERA

Die starke und elektroschwache Wechselwirkung werden im 'Standardmodell' der Elementarteilchenphysik als lokale Eichtheorie der Eichgruppe $SU_3 \otimes SU_2 \otimes U_1$ beschrieben. SU_3 beschreibt dabei die starke, $SU_2 \otimes U_1$ die elektroschwache Wechselwirkung, die vereinheitlichte elektromagnetische und schwache Wechselwirkung.

Obwohl viele Vorhersagen dieses Modells mit experimentellen Beobachtungen sehr gut übereinstimmen, ist es in mancher Hinsicht noch wenig zufriedenstellend:

- Es erklärt nicht, warum es Familien bei Quarks und Leptonen gibt.
- Es beinhaltet eine große Zahl freier Parameter.
- Das Higgs-Teilchen, welches eine entscheidende Rolle bei der Massenentstehung der Fermionen spielt, wurde noch nicht nachgewiesen.

	e^-	p
Energie	30 GeV	820 GeV
Teilchenanzahl	5×10^{12}	2×10^{13}
Bunchanzahl	210	210
Wechselwirkungszonen	4	
Umfang	6335m	
geplante Luminosität	$2 \times 10^{31} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$	
maximale e^{+-} Polarisation	84 %	
geplanter Beginn der Experimente	1990	

Tabelle 1.1: Zusammenfassung der wichtigsten HERA-Parameter [WOL86]

- Während die schwache Wechselwirkung zwischen Rechts- und Linkshändigkeit unterscheidet, gibt es im Standardmodell nur linkshändige Ströme.
- Es beschreibt nicht alle Wechselwirkungen ; die Gravitation ist kein Bestandteil des Standardmodells.

Der HERA-Speicherring bietet die Möglichkeit, experimentell einige der offenen Fragen zu klären und Voraussagen von theoretischen Modellen zu testen.

Bei den bei HERA möglichen hohen Impulsüberträgen von $Q_{max}^2 \approx 10^5 \text{ GeV}^2$ wechselwirkt das Elektron nicht mit dem Proton als Ganzem, sondern mit Teilen der Substruktur. Man erwartet daher, daß HERA-Ereignisse in den meisten Fällen einer von zwei Klassen zuzuordnen sind :

- Ereignisse durch neutrale Ströme (NC¹) bei denen zwischen Elektron und Quark ein Photon oder ein Z^0 ausgetauscht wird
- Ereignisse durch geladene Ströme (CC²) bei denen ein $W^{+/-}$ Boson ausgetauscht wird.

Das Diagramm niedrigster Ordnung für diese Prozesse ist in Abb.1.2(a) dargestellt. Das Hauptunterscheidungsmerkmal der beiden Gruppen ist das Lepton im Endzustand: im Fall von NC-Ereignissen findet man im Endzustand ein Elektron, welches man direkt nachweisen kann, während bei CC-Ereignissen ein Neutrino vorliegt, das den Detektor ohne Wechselwirkung verläßt. Ferner findet man bei beiden Ereignistypen einen Jet³, der vom 'getroffenen' Quark kommt und den man inklusiv messen kann. Der Jet der beiden anderen Quarks des Protons bleibt in der Regel im Strahlrohr und ist daher für einen Detektor unsichtbar. Die Beobachtung dieser beiden Prozesse erlaubt es, Strukturfunktionen über einen grossen Q^2 -Bereich zu messen. Da das Standardmodell eine Q^2 -Abhängigkeit der Strukturfunktionen voraussagt und diese Abhängigkeit

¹neutral current = neutraler Strom

²charged current = geladener Strom

³Jet nennt man eine Gruppe von Teilchen in einem Ereignis, deren Impulsvektoren stark korreliert sind. Jets entstehen i.A. durch Hadronisierung von Quarks.

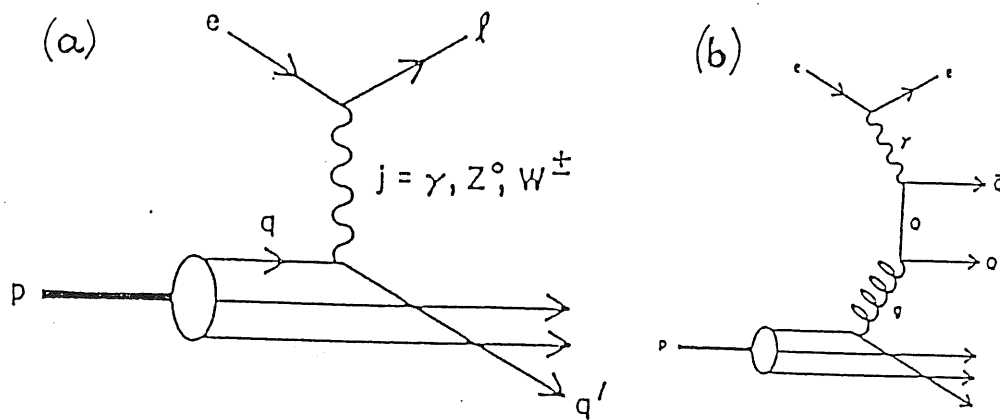


Abbildung 1.2: Diagramme niedrigster Ordnung für NC und CC (a) sowie Photon-Gluon Fusion (b) [WOL86]

im Rahmen der QCD berechnet werden kann, bietet HERA hier durch genaue Messung der Strukturfunktionen und ihrer Q^2 -Abhängigkeit die Möglichkeit eines Tests für das Standardmodell.

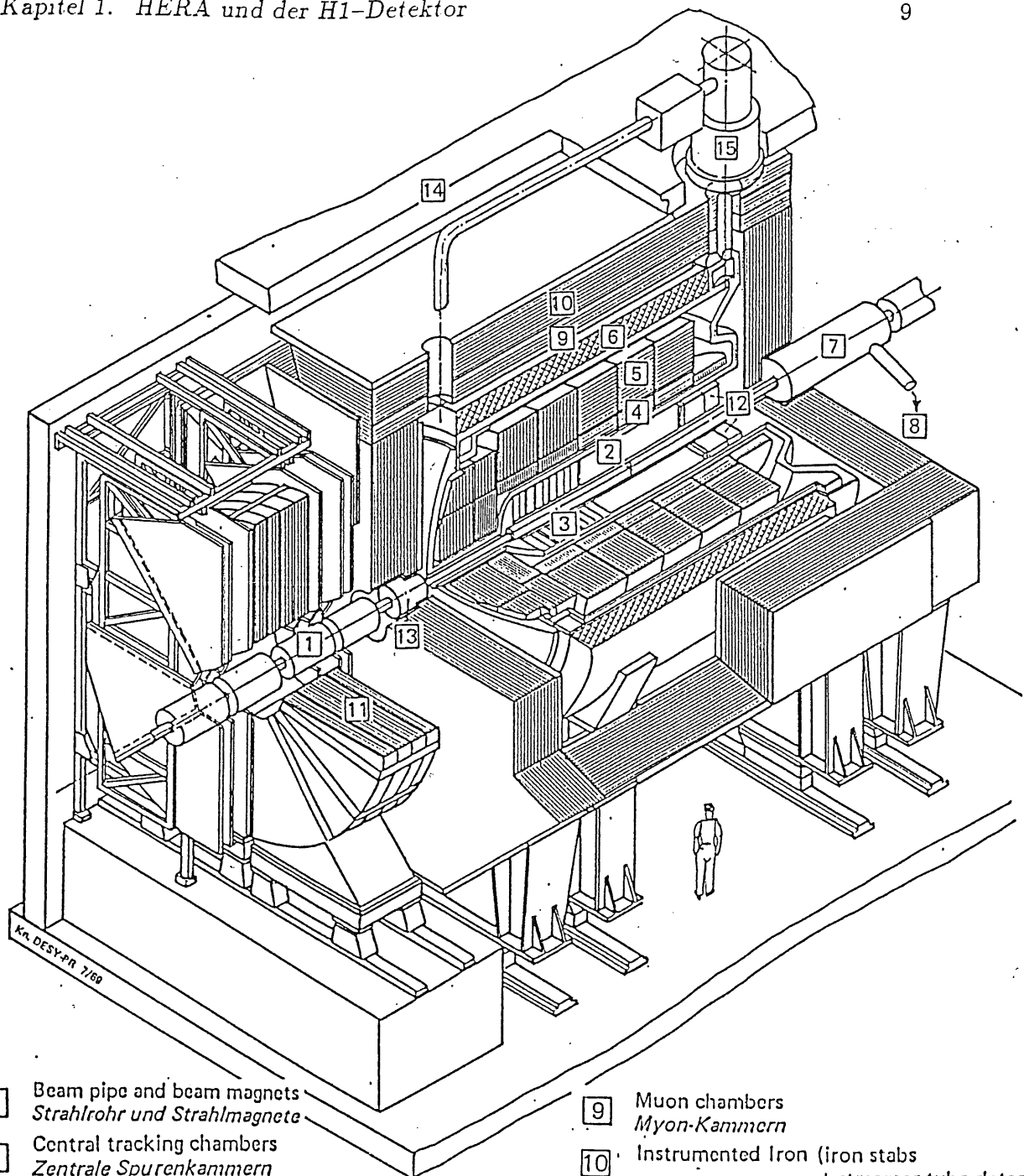
Weiterhin erwartet man von HERA noch die Produktion von Quark-Antiquark Paaren durch Photon-Gluon-Fusion mit der Möglichkeit der Erzeugung schwerer Quarks. Eine Darstellung des zugrundeliegenden Prozesses findet sich in Abb.1.2(b). Darüberhinaus bietet es sich bei HERA auch an, Alternativen zu untersuchen. So ermöglicht z.B. die longitudinale Polarisation des Elektronenstrahls die Suche nach rechtshändigen Strömen, und das hohe Q_{max}^2 erlaubt die Suche nach einer Substruktur von Quarks und Leptonen. Auch die Suche nach dem Higgs-Teilchen und nach weiteren, "exotischen" Ereignissen, wie die Suche nach supersymmetrischen Teilchen oder nach Leptoquarks⁴, sind Aufgaben, für die die Experimente bei HERA geplant werden. Die meisten dieser Ereignisse haben klare Signaturen und lassen sich bei geeigneter Konstruktion des Detektors nachweisen, sofern sie überhaupt auftreten. Eine ausführliche Diskussion dieser Fragen findet sich z.B. in [WOL86].

1.3 Der H1-Detektor

Wie schon erwähnt sind für HERA zwei Experimente im Aufbau, die für leicht unterschiedliche Aufgabenstellungen optimiert wurden. Da es eines der Hauptziele bei HERA sein wird, die Strukturfunktionen (z.B. des Protons) zu bestimmen, muß ein Detektor in der Lage sein, x und Q^2 genau zu messen. Hierzu braucht man hadronische und elektromagnetische Kalorimeter, die eine möglichst gute Auflösung bieten und den gesamten Raumwinkel hermetisch mit hoher Winkelauflösung abdecken, um über die fehlende Energie Ereignisse untersuchen zu können, bei denen Neutrinos entstanden sind. Die Suche nach neuen Effekten erfordert außerdem eine gute Lepton-Identifikation.

⁴Leptoquarks werden u.a. von Superstring- und GUT-Theorien vorausgesagt

Die wichtigsten Komponenten des H1-Detektors sind in Abb.1.3 zu sehen. Aufgrund der Kinematik der e-p-Wechselwirkung ist der Detektor asymmetrisch bezüglich des Wechselwirkungspunktes konstruiert. Da die Teilchen sich überwiegend in Flugrichtung der Protonen bewegen, ist die Akzeptanz des Detektors in dieser Richtung optimiert. Der hadronische Teil des H1-Kalorimeters besteht aus Edelstahl als Absorber und Flüssig-Argon Ionisationskammern als Auslese. Durch die feine Segmentierung des Kalorimeters ($3 * 3 \text{ cm}^2$ Segmente) ist der H1-Detektor besonders geeignet, sowohl einzelne Leptonen als auch Leptonen in Jets zu identifizieren und ihre Energie zu messen. Insbesondere dieses Merkmal soll das Erkennen neuer, bisher unbekannter Teilchen erleichtern.[H1-86]



- | | | | | |
|---|---|--|---|---|
| 1 | Beam pipe and beam magnets
<i>Strahlrohr und Strahlmagnete</i> | 9 | Muon chambers
<i>Myon-Kammern</i> | |
| 2 | Central tracking chambers
<i>Zentrale Spurenkammern</i> | 10 | Instrumented Iron (iron stabs
+ streamer tube detectors)
<i>Instrumentiertes Eisen (Eisenplatten +
Streamerröhren-Detektoren)</i> | |
| 3 | Forward tracking chambers and Transition radiators
<i>Vorwärtspurkammern und Übergangstrahlungsmodul</i> | 11 | Muon toroid magnet
<i>Myon-Toroid-Magnet</i> | |
| 4 | Electromagnetic Calorimeter (lead)
<i>Elektromagnetisches Kalorimeter (Blei)</i> | } Liquid Argon
<i>Flüssig Argon</i> | 12 | Warm electromagnetic calorimeter
<i>warmes elektromagnetisches Kalorimeter</i> |
| 5 | Hadronic Calorimeter (stainless steel)
<i>Hadronisches Kalorimeter (Edelstahl)</i> | | 13 | Plug calorimeter (Cu, Si)
<i>Vorwärts-Kalorimeter</i> |
| 6 | Superconducting coil (1,2 T)
<i>Supraleitende Spule (1,2 T)</i> | 14 | Concrete shielding
<i>Betonabschirmung</i> | |
| 7 | Compensating magnet
<i>Kompensationsmagnet</i> | 15 | Liquid Argon cryostat
<i>Flüssig Argon Kryostat</i> | |
| 8 | Helium cryogenics
<i>Helium Kälteanlage</i> | | | |

Abbildung 1.3: Schnitt durch den H1-Detektor

Kapitel 2

Physik der Driftkammer

Dieses Kapitel enthält eine Einführung in die Aufgaben und die Funktionsweise von Spurdetektoren im Allgemeinen und Driftkammern im Besonderen, sowie eine Beschreibung der zentralen Driftkammern des H1-Detektors und ihres mechanischen Aufbaus.

2.1 Funktionsweise von Driftkammern

Spurdetektoren bei Hochenergiephysik-Experimenten haben die Aufgabe, Informationen über den Verlauf der Bahnkurven von entstandenen geladenen Teilchen und ihren Impuls zu liefern, und sie gegebenenfalls zu identifizieren. Der Impuls der Teilchen kann dabei über die Vermessung der Bahnkrümmung in einem Magnetfeld geschehen und die Identifikation u.a. über die Bestimmung des Energieverlusts dE/dx . Zu diesem Zweck ist es notwendig, entlang einer Teilchenbahn die Ortskoordinaten des Teilchens an vielen Punkten zu vermessen, um die Bahn rekonstruieren zu können und die gewünschten Informationen zu gewinnen.

Der physikalische Prozess zum Nachweis geladener Teilchen beruht zumeist allein auf ihrer elektromagnetischen Wechselwirkung mit Materie. Beim Durchgang durch Materie (im Fall einer Driftkammer durch ein Gas) erleiden geladene Teilchen einen Energieverlust durch Ionisation. Der Betrag dieses Energieverlustes hängt von der Geschwindigkeit v ($v = \beta c$, c =Lichtgeschwindigkeit im Vakuum), von der Ladung q sowie der Masse m des Teilchens ab. Er kann im Rahmen des PAIM-Modells¹ gut beschrieben werden.

Aufgrund ihrer höheren Beweglichkeit, verglichen mit den Ionenrümpfen, können die beim Ionisationsprozess freigewordenen Elektronen in einem äußeren elektrischen Feld Energie gewinnen und ihrerseits weitere Gasatome ionisieren, wenn ihre kinetische Energie die Ionisierungsenergie der Gasatome übersteigt. Dabei 'driften' die Elektronen in Richtung auf die Anode. Dieser Prozess kann näherungsweise durch eine zeitlich konstante mittlere Driftgeschwindigkeit beschrieben werden, wenn der Energieverlust durch Ionisation und inelastische Stöße und der Energiegewinn durch die Beschleunigung im Feld sich gerade

¹PAIM = Photon-Absorptions-Ionisations-Modell siehe auch [ALL80]

aufheben. Eine konstante Driftgeschwindigkeit erhält man dadurch, daß man entlang des Driftweges für eine möglichst konstante elektrische Feldstärke sorgt [KLE84].

Durch diese (durch Messung bekannte) Driftgeschwindigkeit kann man den relativen Ort der Primärionisation bestimmen, indem man die Driftzeit Δt mißt, welche zwischen dem Teilchendurchgang und der Anstiegsflanke des Anodenimpulses vergangen ist. Bei bekannter Driftgeschwindigkeit kann dann aus der Driftzeit der Abstand von der Anode zum Ort der Primärionisation berechnet werden. Die Messung der Signalthöhe läßt zusätzlich Rückschlüsse auf den Energieverlust dE/dx , und damit auf die Teilchenart zu. Wegen der niedrigen Feldstärke in der Region zwischen zwei benachbarten Anodendrähten ist das nur dann möglich, wenn man zwischen diesen Drähten zusätzliche Potential-Korrekturdrähte einfügt, um das elektrische Feld in der Zelle entsprechend uniform zu halten. Gleichzeitig bietet diese Anordnung den Vorteil, das Übersprechen zwischen zwei benachbarten Signaldrähten zu dämpfen.

Driftkammern bestehen aus vielen solcher Driftzellen. Man unterscheidet sie nach der geometrischen Anordnung dieser Zellen z.B. in ebene und zylindrische Driftkammern. Ein besonderer Typ einer zylindrischen Driftkammer stellt die Jetkammer-Geometrie dar. Dabei mißt man Segmente radialer Spuren in einer Zelle mit Signal(=Anoden)drähten [KLE84]. Die erste Jetkammer wurde im Rahmen des JADE-Experimentes bei PETRA mit Erfolg verwendet [DRU80]. Durch die Anordnung der Signaldrähte bei der Jetkammer muß man jedoch, im Vergleich zu herkömmlichen Driftkammern größere Driftstrecken in Kauf nehmen.

Um aus den Spurdaten eines Teilchens Informationen über dessen Impuls zu gewinnen, betreibt man Spurdetektoren unter dem Einfluß eines äußeren Magnetfeldes. In diesem Feld werden geladene Teilchen durch die Lorentzkraft aus ihrer geraden Bahn abgelenkt, wodurch Rückschlüsse auf ihren Impuls möglich werden. Dies hat aber auch zur Folge, daß die driftenden Elektronen ebenfalls aus ihrer Bahn abgelenkt werden und nicht direkt, sondern unter einem Winkel, dem sog. Lorentzwinkel α_L , auf die Signaldrahtebene zulaufen. In erster Näherung hängt der Lorentzwinkel von der Driftgeschwindigkeit v_D , dem äußeren Magnetfeld B und der elektrischen Feldstärke ϵ ab mit

$$\tan(\alpha_L) = \frac{v_D B}{\epsilon}. \quad (2.1)$$

Eine Darstellung des Driftfeldes der CJC1 unter dem Einfluß eines solchen äußeren Magnetfeldes zeigt Abbildung 2.1. Die Ortsauflösung einer Einzelspur hängt jedoch von dem Winkel ab, unter dem eine Teilchenspur die Driftzelle durchquert. Sie wird i.A. maximal, wenn die Teilchenbahn genau senkrecht zur Driftrichtung verläuft. Um dabei den Effekt der Lorentzablenkung der Elektronen zu kompensieren kann man, wie bei den zentralen Driftkammern des H1-Detektors, die Sektoren um einen Winkel gegen die rein radiale Anordnung kippen. Damit erreicht man, daß die Bahnen hochenergetischer Teilchen näherungsweise senkrecht zur Driftrichtung verlaufen.

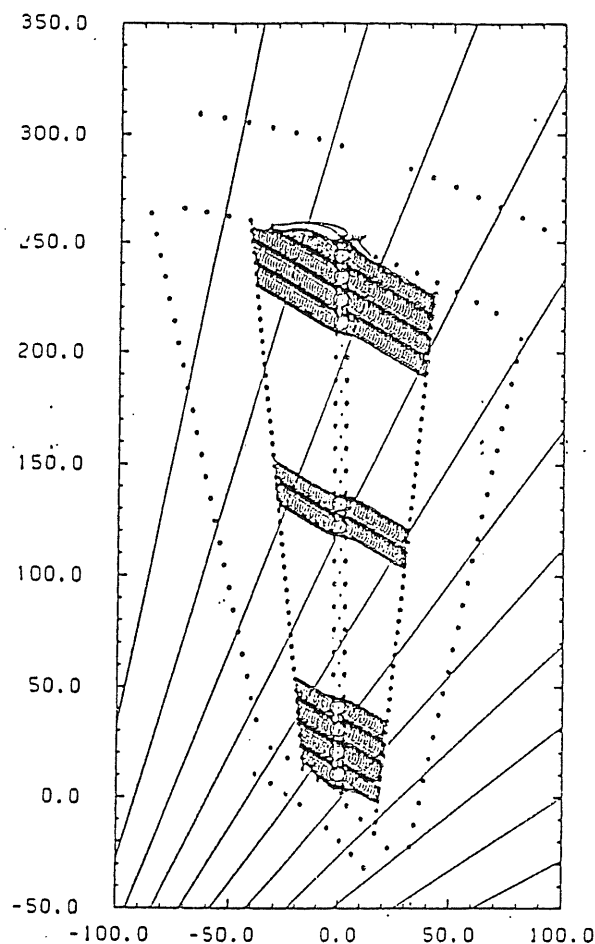


Abbildung 2.1: Driftfeld in der CJC1 unter Einfluß eines Magnetfeldes

2.2 Die Jetkammern CJC1 und CJC2

Der Spurdetektor von H1 zur Rekonstruktion der Topologien von Ereignissen ist aufgrund der HERA-Kinematik in Vorwärts- und Zentraldetektoren getrennt (siehe Abb.1.3). Der zentrale Spurdetektor besteht dabei aus den inneren und äußeren zentralen Driftkammern CJC1 und CJC2² und den zentralen z-Kammern CIZ³ und COZ⁴. Die Zellstruktur der beiden zentralen Jetkammern ist in Abb.2.2 dargestellt. Sie bestehen aus zwei Ringen mit 30 bzw. 60 Zellen mit 24 bzw. 32 Signaldrähten pro Zelle, welche parallel zur Strahlrichtung gespannt sind. [BÜR89]

Die Signaldrähte bilden zwei parallele Ebenen, die zur Kompensation des Lorentzwinkels um ungefähr 30° gegen die radiale Richtung geneigt sind. Der Abstand dieser Drahtebenen beträgt $2 * 150 \mu m$ und die Signaldrähte liegen jeweils abwechselnd in einer dieser Ebenen, um die Rechts-Links-Ambiguität⁵

²Central Jet Chamber

³Central Inner z-chamber

⁴Central Outer z-chamber

⁵Bei nur einer Drahtebene läßt sich eine Spur nicht von ihrer 'Spiegelspur' auf der anderen Seite der Drahtebene unterscheiden. Durch die unterschiedlichen Driftzeiten der Elektronen zu den beiden, durch das Staggering entstehenden, Drahtebenen läßt sich diese Ununterscheidbar-

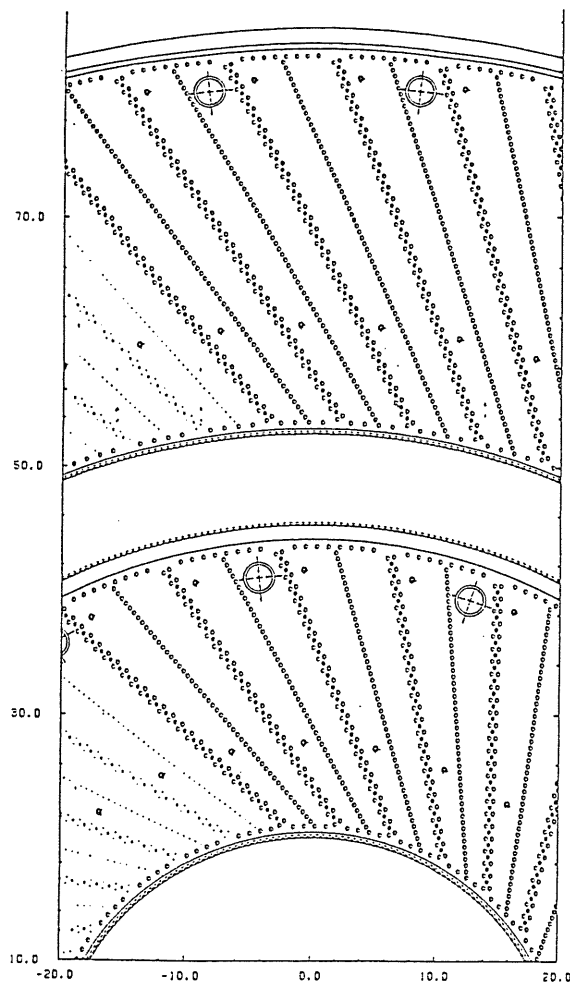


Abbildung 2.2: Zellstruktur der H1-Jetkammern

auflösen zu können. Durch dieses sog. Staggering wird außerdem die elektrostatische Stabilität der Zelle erhöht. Zwischen zwei Signaldrähten befinden sich zwei Potentialdrähte zur Feldformung. Eben solche Potentialdrähte befinden sich am Rand jeder Zelle, um dort auftretende Feldinhomogenitäten zu kompensieren. Die einzelnen Zellen sind durch Kathodendrahtebenen voneinander getrennt. Die Neigung der Driftzellen gegen die radiale Ebene ist auf das vorgesehene Magnetfeld von 1.2 Tesla (parallel zur Strahlachse) und das geplante Kammergas abgestimmt. Die Signale werden jeweils an beiden Drahtenden mit empfindlichen Vorverstärkern und schnellen Analog-Digital-Wandlern alle 10 ns ausgelesen. Mit dieser Konstruktion sollen die Leistungsdaten bei beiden Kammern erreicht werden [H1-86], wie sie in Tabelle 2.1 zusammengefasst sind. Dabei beziehen sich r , ϕ und z auf das, für den H1-Detektor benutzte, Zylinderkoordinatensystem wobei die z -Richtung parallel zur Strahlrichtung bzw. zu den Drähten der CJC-Kammern gewählt ist.

Die beiden Jetkammern CJC1 und CJC2 werden nach dem Einbau der Drähte zusammen mit den beiden z -Kammern CIZ und COZ in einen gemeinsamen Tank aus Aluminium montiert. Im Gegensatz zu anderen Jetkammern, bei denen Aluminium auch als Material für die Endplatten verwendet wurde, be-

keit aufheben.

Ortsauflösung in r und ϕ	$\sigma_{xy} \sim 120 \mu m$
Ortsauflösung in z	$\sigma_z \sim 25 mm \hat{=} 1\%$ der Kammerlänge
Impulsauflösung in r und ϕ	$\frac{\delta P}{P^2} \sim 0.003 GeV^{-1}$
Winkel	$\sigma_{\Theta} \sim 17 mrad$
Energieverlust	$\sigma_{\frac{dE}{dx}} \sim 6 \%$
Doppelspurauflösung	$2.5 mm$

Tabelle 2.1: geplante Leistungsdaten der CJC

stehen die Endplatten bei beiden Jetkammern aus GfK⁶. Damit wird durch eine geringere Massenbelegung (0.15 Strahlungslängen incl. Verstärker und Kabel) eine geringere Verfälschung der Energiemessung in den Kalorimetern erreicht. Zwischen den Endplatten befinden sich außerdem eine Anzahl von Stützstangen, um die Durchbiegung der Endplatten zu begrenzen. Die Befestigung der Drähte in den Endwänden wurde mit Hilfe von Crimpteilen⁷ gelöst. Diese Technik ermöglicht einen einfachen Einbau und ein einfaches Auswechseln der Drähte. Abbildung 2.3 zeigt die Konstruktion der Drahtbefestigungen in den Endwänden der Kammer. Durch Testmessungen an einer Reihe von Prototypen wurde nachgewiesen, daß mit der gewählten Konstruktion die vorgegebenen Leistungsdaten erreicht werden.

⁶GfK = Glasfaser-verstärkter Kunststoff

⁷to crimp *engl.* quetschen

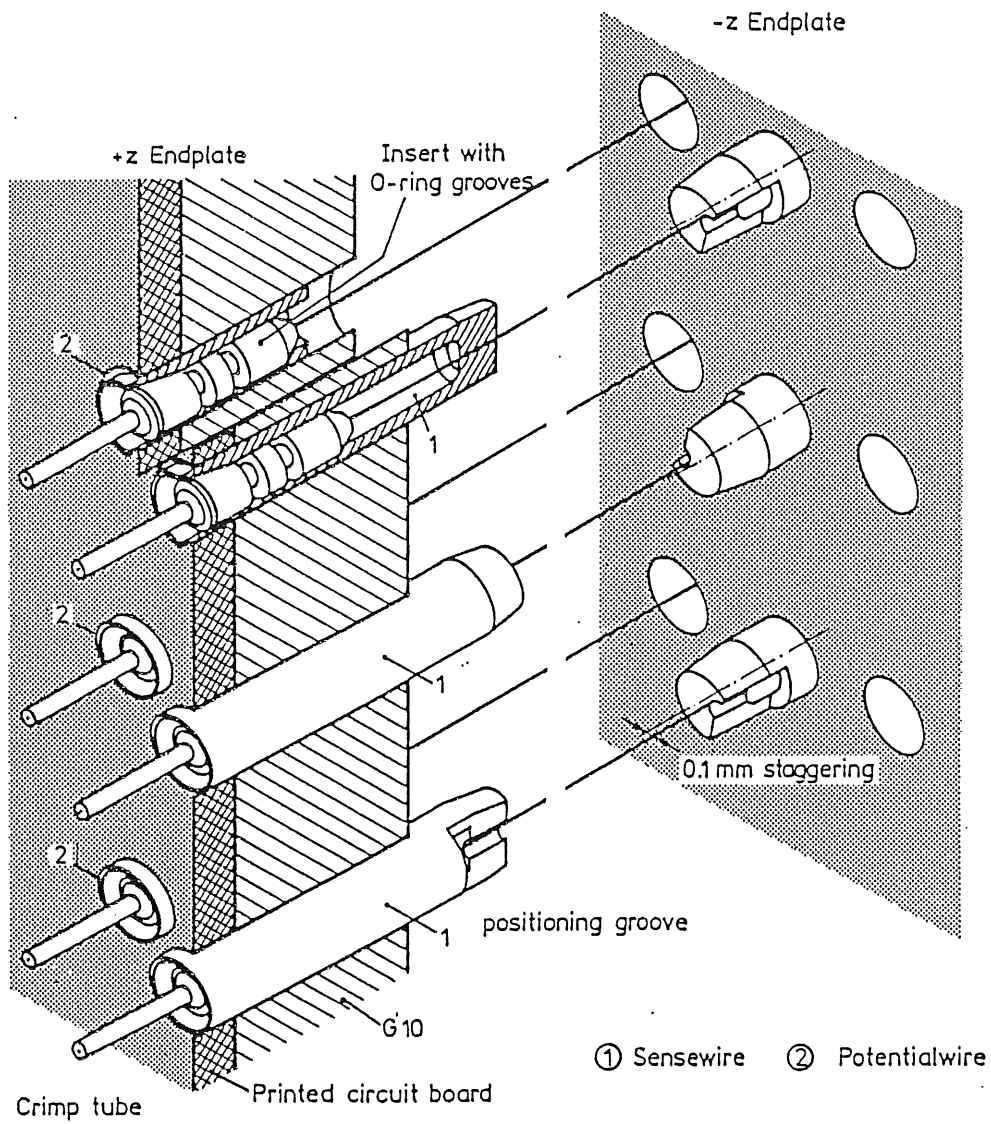


Abbildung 2.3: Drahtbefestigungen der CJC

Kapitel 3

Anforderungen an Meßverfahren

Da das Spannen der Drähte beim Bau einer Driftkammer einen, sowohl vom Zeitaufwand als auch von den Auswirkungen auf die spätere Nutzbarkeit der Kammer, entscheidenden Abschnitt darstellt, ergeben sich direkte Auswirkungen auf die Anforderungen an eine Meßapparatur hinsichtlich Genauigkeit, Bedienbarkeit und Zeitaufwand für die Messung. In diesem Kapitel werden diese Anforderungen sowie ihre Bedeutung und Herkunft näher erläutert.

3.1 Beschreibung des Spannverfahrens

Abbildung 3.1 zeigt den prinzipiellen Aufbau des verwendeten Drahtspannverfahrens. Nachdem der Draht an beiden Enden durch die Crimpteile (1) geführt wurde, und diese in die Endwandbohrungen eingesetzt sind, wird zunächst an einer Seite mit einer speziellen Crimpzange der Draht im Crimpteil fixiert und das überstehende Ende außerhalb der Befestigung abgeschnitten. Am anderen Ende des Drahtes wird das für die betreffende Drahtsorte vorgesehene Zuggewicht angeklemt und der Draht mit dem Gewicht über eine Führungsrolle gelegt. Dabei ist darauf zu achten, daß der Auflagepunkt des Drahtes auf der Rolle möglichst genau in der Fluchtlinie der Durchführung liegt, um unnötige Reibungsverluste zu vermeiden. Wenn das Gewicht frei hängt, sollte die Zugspannung auf den Draht dem Zuggewicht entsprechen, und der Draht kann mit der Crimpzange endgültig befestigt werden. Abschließend wird das Drahtende außerhalb der Kammer abgeschnitten und der Spannvorgang ist beendet.

3.2 Präzision

Die Anforderungen an die Präzision der Messung einer mechanischen Drahtspannung ergeben sich aus den, für die vorgegebene Sollspannung festgelegten Toleranzen. Für die zentralen Driftkammern des H1-Detektors wird eine maximale Abweichung von $\pm 10\%$ zur festgelegten Sollspannung für alle Drahtsorten angestrebt, um die geforderte Feldqualität zu erreichen. Bei der Festlegung der Sollspannungen sind eine Reihe von mechanischen und elektrischen Größen zu beachten :

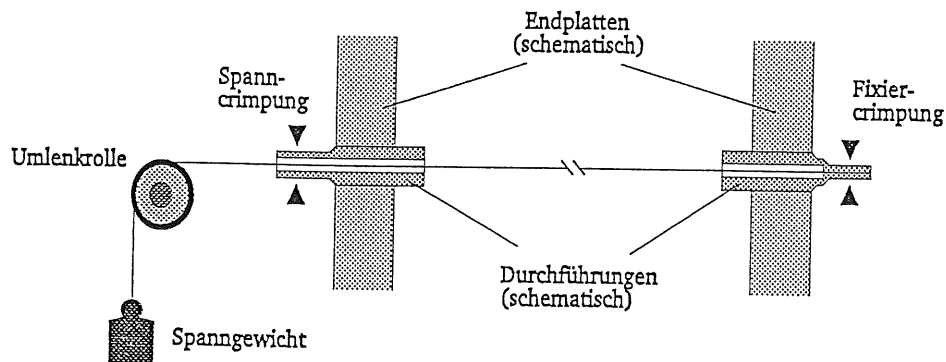


Abbildung 3.1: Drahtspannverfahren

1. Sofern die Sollspannung die Zugfestigkeit des Drahtmaterials überschreitet, besteht die Gefahr inelastischer, unkontrollierter Längenänderungen des Drahtes. Diese Gefahr besteht selbst dann, wenn die Sollspannungen nur unwesentlich unter der Zugfestigkeit liegen, da eine Homogenität der Drähte auf kristalliner Ebene nicht gegeben ist und bei Drähten mit Durchmessern $< 50 \mu\text{m}$ daher mit lokal wesentlich geringerer Belastbarkeit zu rechnen ist.
2. Die mechanischen Anforderungen an die Endplatten hängen wesentlich von der Gesamtsumme aller Drahtspannungen ab. Insbesondere die Durchbiegung der Endplatten stellt hier ein Problem dar. Man versucht also, die Gesamtbelastung der Endplatten durch die gespannten Drähte möglichst gering zu halten.
3. Der gravitationsbedingte Durchhang der Drähte muß klein gehalten werden, um Feldverzerrungen, insbesondere in der Drahtmitte, zu vermeiden. Um das zu erreichen wählt man die Zugspannung der Drähte möglichst groß. Aufgrund der begrenzten Belastbarkeit der Drähte läßt sich ein gewisser Durchhang jedoch nicht vermeiden. Um dennoch die Feldverzerrungen zu minimieren sorgt man für einen etwa gleichgroßen Durchhang der anderen Drahtsorten (siehe auch Tabelle 3.1).
4. Die Drahtspannung muß weiterhin groß genug sein, um eine hinreichende Elongation der Drähte zu erreichen. Im anderen Fall können mechanische Toleranzen des Endplattenabstands zum Durchhängen von einzelnen Drähten führen.

Da diese unterschiedlichen Anforderungen miteinander konkurrieren, ist es notwendig, hier Kompromißlösungen zu finden. Für die zentralen Driftkammern CJC1 und CJC2 des H1-Detektors wurden Sollspannungen festgelegt, die in

Tabelle 3.1 zusammengestellt sind. Angegeben ist dabei das Zuggewicht in g , mit dem die Drähte beim Einbau belastet werden.

Drahtsorte	Signal-	Potential-	Kathoden-
Material	W	CuBe	CuBe
Zuggewicht F [g]	60.0	400.0	600.0
Toleranz ΔF [g]	± 6	± 40	± 60
Durchmesser ϕ [μm]	20.0	127.0	180.0
Dichte ρ [$\frac{g}{cm^3}$]	19.2	8.26	8.26
Elongation $\frac{\Delta L}{L}$ [$\frac{mm}{m}$]	3.9	2.4	1.5
Durchhang Δs [mm]	0.13	0.15	0.24

Tabelle 3.1: Drahtparameter und -materialien CJC

Auf die Auslegung der Meßapparatur auf die Messung der Felddrähte wurde verzichtet. Die Zugspannung dieser Drähte stellt wegen der hohen Zugspannung und des daraus folgenden Durchhangs keine kritische Komponente in Bezug auf das Kammerfeld dar.

3.3 Zeitaufwand für eine Messung

Die Messung des Istwertes der Zugspannungen sollte in der Regel kurz nach dem Spannvorgang erfolgen, wenn der Draht noch zugänglich ist und bei Bedarf leicht ausgetauscht werden kann. Um durch die Messung den Zeitaufwand für den gesamten Vorgang (Spannen und Prüfen) nicht zu sehr auszudehnen sind zwei Punkte wichtig: einerseits darf das Einrichten der Meßapparatur nicht zu aufwendig sein, um ein zügiges Arbeiten zu ermöglichen, und andererseits darf der eigentliche Meßvorgang inklusive der Auswertung die Arbeiten ebenfalls nicht aufhalten. Als wünschenswerter mittlerer Zeitaufwand für eine Messung eines einzelnen Drahtes sollte daher insgesamt, d.h. zusammen mit dem Aufwand zum Einrichten der Apparatur, eine Zeit von ca. 30 s nicht überschritten werden. Dieser Wert stellt bei einer Dauer des eigentlichen Spannvorgangs von ca. 2 – 4 Minuten einen akzeptablen Kompromiß dar.

3.4 Bedienung

Die Bedienung des gesamten Meßsystems stellt zusammen mit dem Zeitaufwand für eine einzelne Messung den kritischsten Aspekt des gesamten Systems dar. Für eine effektive Nutzung des Systems sind in diesem Zusammenhang fünf Punkte besonders wichtig :

- Die Steuerung des Meßvorgangs sollte automatisiert sein, um zusätzliche Fehlerquellen zu vermeiden.

- Das Ergebnis der Messung sollte sowohl als Zahlenwert als auch graphisch erfolgen, um dem Benutzer eine sichere und schnelle Bewertung zu ermöglichen.
- Das Anschließen der Meßeinrichtung an den bzw. die Drähte muß mit Hilfe entsprechender Adapter einfach und fehlerfrei erfolgen können.
- Mehrere Drähte sollten gleichzeitig an das System anzuschließbar sein, um den zeitlichen Aufwand für das Kontaktieren der Drähte zu minimieren. Dabei sollte das System selbstständig feststellen, welche der kontaktierten Drähte bereits vorhanden sind und vermessen werden können.
- Um nachträglich eine Kontrolle oder Verbesserungen z.B. des Spannverfahrens zu ermöglichen, sollten die Ergebnisse der Messungen in einer Datei gespeichert werden. Sie stehen dann etwa für statistische Untersuchungen oder als Grundlage für spätere Korrekturen bei der Rekonstruktion von Teilchenspuren zur Verfügung.

Kapitel 4

Verfahren zur Messung mechanischer Drahtspannungen

Praktisch alle Verfahren zur Messung mechanischer Drahtspannungen beruhen darauf, daß die Resonanzfrequenz ν_{res} eines schwingenden Drahtes der Länge L , der Querschnittsfläche A und der Dichte ρ von seiner mechanischen Spannung F_0 abhängt nach der Formel

$$\nu_{res} = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{F_0}{A\rho}}. \quad (4.1)$$

Eine Herleitung dieser Formel befindet sich im Anhang A. Um die mechanische Spannung zu bestimmen ist es notwendig, den Draht steuerbar zu Schwingungen unterschiedlicher Frequenz anzuregen und dabei die Resonanzfrequenz zu bestimmen. Die mechanische Drahtspannung läßt sich dann aus der Resonanzfrequenz nach Gleichung 4.1 bestimmen. Unmittelbare Voraussetzung hierfür ist die Homogenität des Drahtmaterials über die gesamte Länge, insbesondere eine konstante Massenbelegung. Dies ist für die Drahtmaterialien der CJC erfüllt.

4.1 Anregung mechanischer Schwingungen

Bei den bisher bei ähnlichen Anwendungen in der Praxis eingesetzten Verfahren (siehe auch [BÜR86], [REG84], [CAL80] und [HUL81]) kann man zwischen einer Anregung durch externe elektrische oder magnetische Felder unterscheiden.

Anregung durch ein elektrisches Feld

Bei der Anregung durch ein elektrisches Feld werden der Draht und einer der unmittelbaren Nachbardrähte (oder eine in die Umgebung eingeführte Elektrode) gegeneinander auf eine Hochspannung (typisch 1 – 3 kV, der genaue Wert hängt u.a. vom Abstand der Drähte ab) gelegt. Wenn diese Hochspannung als Wechselspannung ausgeführt wird, wirken auf den Draht elektrostatische Kräfte mit der Frequenz der Wechselspannung. Diese Kräfte bewirken die mechanische Schwingung des Drahtes.

Anregung durch ein Magnetfeld

Bei der Anregung durch ein Magnetfeld wird ein schwacher Permanentmagnet (B typisch 100 mT) in die Umgebung des Drahtes gebracht und dem Draht ein Wechselstrom $I(t) = I_0 \sin(\omega t)$ aufgeprägt. Die Lorentzkraft

$$dF(t) = I_0 B dL \sin(\omega t) \quad (4.2)$$

auf ein Längenelement dL bewirkt dann eine mechanische Schwingung des Drahtes.

4.2 Bestimmung der Resonanzfrequenz

Um die Resonanzfrequenz eines schwingenden Drahtes zu bestimmen, muß man einen resonanzabhängigen Parameter des Drahtes in Abhängigkeit von der Anregungsfrequenz messen. Zu diesem Zweck ist es möglich, entweder direkt von der Frequenz abhängige Größen zu verwenden (direkte Verfahren), oder mit geeigneten Mitteln andere Parameter frequenzabhängig zu machen (indirekte Verfahren). An dieser Stelle werden einige gebräuchliche Verfahren sowie das dieser Arbeit zugrundeliegende Prinzip kurz erläutert :

Visuelle Beobachtung des Drahtes

Die Amplitude des schwingenden Drahtes kann optisch z.B. mit Hilfe eines Mikroskops beobachtet werden und damit die Resonanzfrequenz als diejenige Anregungsfrequenz mit der größten resultierenden Amplitude.

Laseroptische Beobachtung der Phasendifferenz

Die Schwingung eines angeregten Drahtes ist gegen die anregende Schwingung bei Resonanz um 90° phasenverschoben. Bei der Messung beleuchtet ein Laser den schwingenden Draht, und zwar senkrecht zur Schwingungsebene des Drahtes. Der schwingende Draht moduliert die Intensität des Lasers, dessen Licht hinter dem Draht auf eine Photodiode trifft. Das Signal der Photodiode und das Signal der Anregungsschwingung werden auf den X- bzw. Y-Eingang eines Oszilloskops gelegt. Die dabei entstehenden Lissajous-Figuren bieten die Möglichkeit einer genauen Frequenzbestimmung.

Dieses Verfahren wurde bei der Konstruktion des zentralen Spurdetektors für das UA1-Experiment bei CERN verwendet [CAL80].

Messung des Drahtwiderstandes

Der Drahtwiderstand ist eigentlich keine Größe, die von der Bewegung des Drahtes abhängt. Um ihn dennoch zur Bestimmung der Schwingungsfrequenz heranzuziehen ist es notwendig, eine indirekte Abhängigkeit zu erzeugen. Ein gangbarer Weg ist es, die Temperaturabhängigkeit des Widerstands zu nutzen, indem man den Draht (z.B. durch einen Strom) aufheizt. Er wird sich dann während der Schwingung durch Konvektion abkühlen und dabei seinen

Widerstand ändern. Da die Konvektion von der Geschwindigkeit der Drahtbewegung und damit von der Amplitude abhängt, ist die Abkühlung umso größer, je größer die Amplitude ist und bei Resonanz maximal. Gleichzeitig wird auch der Drahtwiderstand minimal und die Resonanzfrequenz kann durch Minimieren des Drahtwiderstandes gefunden werden. Bei der Meßeinrichtung, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde, wurde dieses Verfahren zusammen mit einer elektrostatischen Anregung unter dem Namen RHW¹ verwendet.

4.3 Vergleich der möglichen Verfahren

Die Anregung zu mechanischen Schwingungen mit Hilfe eines Magnetfeldes erfordert die Einbringung und Positionierung eines kleinen Permanentmagneten in die unmittelbare Umgebung des Drahtes und zusätzlich einen elektrischen Kontakt des Drahtes zu einer geeigneten Spannungsquelle. Ein solches Verfahren ist nur anwendbar, solange der Zugang zum Draht noch gewährleistet ist. Daher muß bei der Reihenfolge der Drähte beim Spannen auf diesen Zugang Rücksicht genommen werden. Außerdem ist eine nachträgliche Überprüfung der Drahtspannungen, z.B. nach dem Einbau in den Tank, nicht mehr möglich. Bei einer elektrostatischen Anregung dagegen ist es unerheblich ob der Draht mechanisch noch zugänglich ist oder nicht, da die Anregung lediglich einen elektrischen Kontakt zum Draht erfordert.

Bei über 10000 Drähten, wie es bei der CJC der Fall ist, ist eine optische Beobachtung eines einzelnen schwingenden Drahtes mit einer Amplitude von einigen Millimetern aus praktischen Gründen nahezu ausgeschlossen. Auch eine laseroptische Beobachtung erfordert eine genaue Positionierung des Laserstrahls auf einen Draht. Diese Positionierung ist zwar möglich, erfordert aber einen erhöhten Zeitaufwand. Außerdem könnten andere Drähte im Laserstrahl eine Messung verhindern, indem sie die Photodiode hinter dem Draht ganz oder teilweise bedecken. Ein solches Verfahren ist daher nur bei solchen Kammern verwendbar, bei denen die Drahtebenen parallel sind oder bei denen die Spannfolge auf den nachfolgenden Meßvorgang abgestimmt wird. Im Übrigen ist bei beiden optischen Verfahren ein Nachmessen der Drähte bei geschlossener Kammer im Allgemeinen nicht möglich. Dieses Nachmessen kann jedoch notwendig und sinnvoll sein, da beim Spannvorgang die Endplatten leicht gegeneinander verwunden werden können. Wenn diese Verwindung beim Einbau rückgängig gemacht wird, verringert sich die mechanische Spannung, insbesondere der äußeren Drähte.

Die bei der vorliegenden Arbeit verwendete Methode der Messung des temperaturabhängigen Drahtwiderstands erlaubt außerdem als einzige die Messung mehrerer Drähte ohne eine Umpositionierung oder Umkontaktierung von Anregungs- bzw. Meßteil des Systems.

¹Resonance-measurement of a Heated Wire

4.4 Das RHW-Verfahren

Die verwendete Methode kombiniert das Prinzip der elektrostatischen Anregung zu mechanischen Schwingungen mit der Messung der Resonanzfrequenz über die Bestimmung des (temperaturabhängigen) Drahtwiderstands. In diesem Abschnitt wird das Meßprinzip im Detail erläutert, während in den folgenden Kapiteln der elektronische Aufbau des Systems und die zugehörigen Algorithmen beschrieben werden.

4.4.1 Meßprinzip

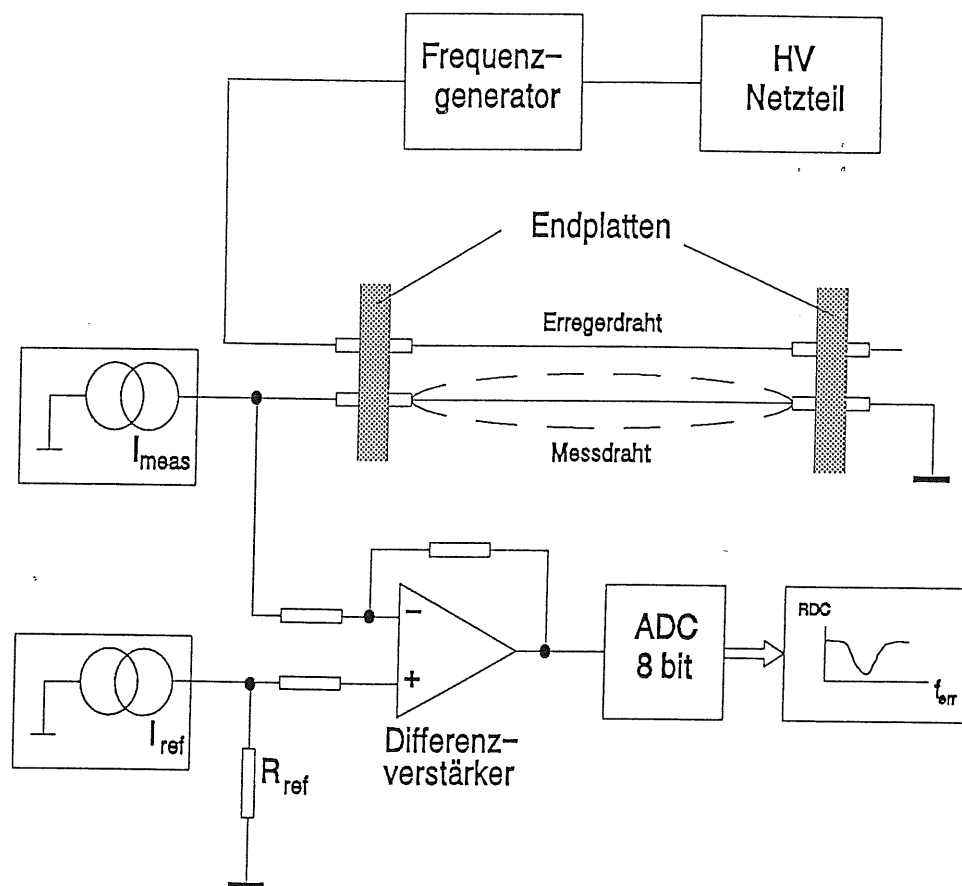


Abbildung 4.1: RHW-Meßprinzip

Abbildung 4.1 zeigt den prinzipiellen Meßaufbau wie er beim WTB II-System verwendet wird. Ein steuerbarer Frequenzgenerator erzeugt Anregungsfrequenzen zwischen 0 und 200 Hz und steuert damit eine (rechteckförmige) Wechsel-Hochspannung U zwischen einem Nachbardraht und dem Draht, dessen mechanische Spannung zu bestimmen ist. Zwischen den Drähten wirkt dann eine Kraft

$F_z \sim \frac{U^2}{r}$, wodurch der Draht in mechanische Schwingungen der (Anregungs-) Frequenz ω gerät. Dem zu messenden Draht und einem Referenzwiderstand wird ein Gleichstrom aufgeprägt, wodurch sich der Draht leicht aufheizt. Die erforderliche Temperaturerhöhung ist abhängig vom verwendeten Drahtmaterial, insbesondere von der Abhängigkeit des Drahtwiderstands von der Temperatur. Sie beträgt für die Drähte der CJC-Kammern ca. 5–20 K. Wenn der Draht bei einer Anregungsfrequenz im Bereich seiner Resonanzfrequenz schwingt, kühlt er sich durch Konvektion ab, und zwar abhängig von der Amplitude. Diese Abkühlung bewirkt eine Änderung seines elektrischen Widerstands. Auf diese Weise wird der Drahtwiderstand zu einem Maß für die Amplitude der Schwingung bei der Frequenz ω . Der Wert dieses Widerstandes wird mit dem Wert des Referenzwiderstands verglichen und das Ergebnis mit einem ADC² digitalisiert und ausgelesen. Aus dem Verlauf dieser Vergleichswerte in Abhängigkeit von der Anregungsfrequenz läßt sich die Resonanzfrequenz des Drahtes und damit seine mechanische Spannung berechnen. Ein Kontrollcomputer ändert die Anregungsfrequenz innerhalb eines vorzuwählenden Frequenzintervalls und berechnet aus allen zugehörigen Widerstandsmesswerten den Wert des Widerstandsminimums und der zugehörigen Anregungsfrequenz.

Um von diesem vorläufigen Wert für die Resonanzfrequenz auf den 'wahren' Wert zu schließen ist es notwendig, einige Korrekturen anzubringen. So bewirkt die Temperaturänderung des Drahtes außer einer Änderung seines elektrischen Widerstands auch eine Längenänderung und damit eine Änderung der Zugspannung.

4.4.2 Thermische Korrekturen

Der folgende Abschnitt enthält Abschätzungen über Korrekturen, die bei der Berechnung der 'wahren' Resonanzfrequenz aus den mit der Meßeinrichtung gewonnenen Meßwerten berücksichtigt werden müssen.

Wesentlicher Effekt bei dem hier verwendeten Verfahren ist die Änderung der physikalischen Parameter des Drahtmaterials durch Temperaturänderungen. Neben der erwünschten Temperaturabhängigkeit des Drahtwiderstandes resultiert die Änderung der Drahttemperatur jedoch auch in Änderungen in den geometrischen Abmessungen des Drahtes. Insbesondere die Drahtlänge ändert sich als Funktion der Drahttemperatur. Dies bewirkt eine Variation der Drahtspannung und damit eine Verschiebung der Resonanzfrequenz. Diese Verschiebung muß als Korrektur in die Berechnung der Drahtspannungen aus der Resonanzfrequenz durch das Auswerteprogramm eingehen.

Thermische Ausdehnung der Drähte

Die Längenänderung ΔL eines Drahtes der Länge L durch eine Temperaturänderung ΔT ist im Bereich von ca. 0 – 300° C näherungsweise linear gegeben

²Analog to Digital Converter

durch [WAL87]

$$\Delta L = L\alpha\Delta T.$$

Dabei ist α , der Temperatureausdehnungskoeffizient, eine materialabhängige Konstante der Dimension $[1/K]$. Die Änderung der Zugspannung kann bei bekannter Längenänderung dann aus

$$\Delta F = \epsilon A \frac{\Delta L}{L}$$

(ϵ = Elastizitätsmodul, A = Drahtquerschnitt) berechnet werden. Faßt man beide Ausdrücke zusammen, erhält man als Abschätzung für die Änderung der Zugspannung

$$\Delta F = \epsilon \alpha A \Delta T \quad (4.3)$$

Eine Übersicht über die Drahtparameter zeigt Tabelle 4.1. Die resultierenden Werte für die Resonanzfrequenz ν_{res} sowie die Verschiebungen von Zugspannung und Resonanzfrequenz (bezogen auf die Drahtlänge von 2290.0 mm) sind in Tabelle 4.2 zusammengefasst. In den folgenden Abschnitten werden diese Werte verwendet, um Abschätzungen der notwendigen Korrekturfaktoren zu gewinnen.

Drahtsorte	Material	ρ [$10^6 gm^{-3}$]	α [$10^{-6} K^{-1}$]	ϵ [$10^7 \frac{p}{mm^2}$]
Signaldraht	W	19.30	4.5	4.19
Potentialdraht	CuBe	8.26	17.8	1.30
Kathodendraht	CuBe	8.26	17.8	1.30

Tabelle 4.1: Materialkonstanten der Drahttypen

Drahtsorte	A [$10^{-10} m^2$]	F [g]	ν_{res} [Hz]	ΔF [$\frac{g}{K}$]	$\Delta \nu_{res}$ [$\frac{Hz}{K}$]
Signaldraht	3.14	60.0	68.05	0.06	0.03
Potentialdraht	126.68	400.0	42.28	2.93	0.14
Kathodendraht	254.47	600.0	36.54	5.89	0.17

Tabelle 4.2: Temperaturabhängigkeit von F und ν_{res}

Bestimmung der Temperaturänderung

Für Temperaturänderungen des Drahtes im Verlauf einer Messung sind zwei Effekte verantwortlich. Zunächst wird der Draht durch den Gleichstrom aufgeheizt. Diese Temperaturänderung wird ganz oder teilweise kompensiert, wenn der Draht in Resonanz schwingt und sich durch Konvektion abkühlt. Der genaue Wert der Temperaturerhöhung ist kaum berechenbar, da er z.B. wesentlich von der Oberflächenstruktur und äußeren Bedingungen wie Raumtemperatur und

Luftfeuchtigkeit abhängt. Empirisch zeigt sich jedoch, daß bei einer konstanten Umgebung (Luftfeuchtigkeit, Temperatur etc.) beim Aufheizen mit einem Gleichstrom, die Temperaturerhöhung nach [LIN88] gegeben ist durch

$$\Delta T \cong \frac{I^2 R}{\lambda A_0}.$$

Dabei ist $I^2 R$ die Heizleistung, A_0 die wirksame Oberfläche (Kühlfläche) und λ der von der Drahtart abhängige Wärmeaustauschkoeffizient. Die Abkühlung des Drahtes durch Konvektion ist dagegen stark abhängig vom (momentanen) Wärmeleitwert der Luft. Die Anwendung des RHW-Verfahrens erfordert also das Konstanthalten der äußeren Parameter (s.o.), da von ihnen die Korrekturfaktoren zur Umrechnung von der 'gemessenen' auf 'wahre' Resonanzfrequenz abhängen. Da die Verdrahtung der beiden Kammern in einem Staubzelt stattfindet, dessen klimatische Bedingungen innerhalb einer relativ geringen Schwankungsbreite gehalten wird (Temperaturänderung $\Delta T \approx \pm 1^\circ C$), stellen diese Parameter bei der Anwendung des vorgestellten Verfahrens kein kritisches Problem dar. Da sich der absolute Wert der Temperaturänderung jedoch nicht exakt errechnen läßt, muß das System vor dem Einsatz empirisch kalibriert werden, z.B. durch Vergleich einer optischen Messung der Resonanzfrequenz mit dem vom System gemessenen, unkorrigierten Wert.

Um einen Eindruck von der Größenordnung der Temperaturänderung zu gewinnen kann man jedoch ausnutzen, daß die Temperaturabhängigkeit des Drahtwiderstands näherungsweise gegeben ist durch den Ausdruck

$$\Delta R \cong \xi R \Delta T$$

wobei ξ eine reine Materialkonstante ist. Durch Messung des Spannungsabfalls über dem Draht in – und weit außerhalb der Resonanz kann dadurch seine Änderung und damit, bei bekanntem ξ , die Temperaturerhöhung bestimmt werden. Diese Werte wurden für alle Drahtsorten in einer Testmessung bestimmt und sind in Tabelle 4.3 zusammengefasst. Die Verschiebung der Resonanzfrequenz durch Temperaturänderungen während der Messung wird vom Auswerteprogramm durch empirisch gefundene, drahtsortenabhängige Korrekturfaktoren k_{wire} ³ berücksichtigt.

Drahtsorte	Material	$\xi [10^{-3} K^{-1}]$	$\Delta T [K]$	k_{wire}
Signaldraht	W	4.6	+4	1.00
Potentialdraht	CuBe	1.3	+24	1.12
Kathodendraht	CuBe	1.3	+17	1.15

Tabelle 4.3: Temperaturänderungen der Drahtsorten beim RHW-Verfahren

³Der Wert für die Kathodendrähte wurde geschätzt, da zum Zeitpunkt der Messungen die hierfür vorgesehene Hardware noch nicht verfügbar war.

Kapitel 5

Wire Tension Box II

Bei dem, im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Meßsystem handelt es sich um die Weiterentwicklung einer Apparatur, welche beim Bau einer Stereo-Drahtkammer¹ (siehe auch [BÜR86]), verwandt wurde. Das System ermöglicht die halbautomatische Messung von bis zu acht angeschlossenen Drähten und gibt dem Benutzer graphische und textliche Informationen über die mechanische Spannung. Weiter wird bei jeder Messung automatisch ein Meßprotokoll gedruckt und für statistische Auswertungen in einer Datei abgelegt. Auf diese Weise ist z.B. eine Kontrolle und Verbesserung der Spannverfahren während des mehrmonatigen Verdrahtungsvorgangs möglich. In diesem Kapitel wird die Hardware des Systems hinsichtlich ihres elektronischen Aufbaus und ihrer Arbeitsweise beschrieben.

5.1 Systemaufbau

Abbildung 5.7 zeigt einen schematischen Aufbau des gesamten Systems. Die Kontrolle über alle weiteren Einheiten übernimmt dabei ein Mikrocomputer vom Typ IBM-PC/XT. Auf ihm läuft ein Steuer- und Auswerteprogramm, welches über eine Reihe einfacher Kommandos oder alternativ mit Hilfe einer "Maus" bedient wird und alle übrigen Systemkomponenten steuert sowie die Meßergebnisse berechnet und protokolliert. Der Computer bzw. das Kontrollprogramm bedient die restliche Hardware dabei über CAMAC², ein Bussystem, welches im Bereich der Hochenergiephysik verbreitet ist. Eine nähere Beschreibung dieses Programms befindet sich in Kapitel 6.

Die zentralen logischen Funktionen des WTB II-Aufbaus sind in der CAMAC-Einheit WTB II/b zusammengefaßt. Über diese Karte wird insbesondere die Relaisbox WTB II/c mit den notwendigen Steuerinformationen versorgt. Gleichzeitig enthält die Steuereinheit einen, über CAMAC-Kommandos regelbaren Frequenzgenerator. Die hier erzeugten Signale n takten einen Hochspannungsschalter, um aus der Hochspannung eines HV-Netzteils die Wechsel-Hochspannung zur Anregung der Drähte zu erzeugen.

¹SWC = stereo wire chamber

²CAMAC = Computer Aided Measurement And Control

Die eigentliche Messung findet mit Hilfe der Meßkarte WTB II/a statt, welche ebenfalls als CAMAC-Einschubkarte ausgeführt ist. Auf dieser befinden sich neben den Stromquellen für Draht und Referenzwiderstand auch die A/D-Wandler, über welche das Ergebnis einer Einzelmessung ausgelesen wird. Die Karte ist im Meßaufbau bis zu vier mal vorhanden, und zwar einmal für jeden zu messenden Drahttyp, bzw. zu verwendenden Meßstrom. Die von Stromquellen auf diesen Einheiten erzeugten Meßströme werden wie die Steuersignale der Kontrollkarte WTB II/b und die im Hochspannungsschalter erzeugte Wechsel-Hochspannung der Relaisbox WTB II/c zugeführt.

Diese Relaisbox wird benutzt, um die Meßspannungen und die Hochspannung auf die angeschlossenen Drähte zu verteilen. Auf diese Weise können zur Messung programmgesteuert sowohl Hoch- als auch Niederspannungen zwischen mehreren Drähten umgeschaltet werden, ohne die Drähte einzeln mit der Hand anschließen zu müssen. Aus Sicherheitsgründen enthält die Relaisbox einen Steuereingang für ein Relais, welches die Hochspannungszuführung zu den Drahtadaptoren unterbricht (Panik-Taste). Diese Relaisbox verfügt über ein eigenes Netzteil und ist im Meßbetrieb in der unmittelbaren Nähe der Kammer angeordnet. Diese Anordnung ist erforderlich, um die Kabellängen für die beweglichen Kabel kurz zu halten und damit Behinderungen beim Verdrahten zu vermeiden. Die Funktionsweise aller Hardwaremodule werden in den weiteren Abschnitten dieses Kapitels erläutert.

5.2 Die Meßeinheit WTB II/a

Abbildung 5.1 zeigt ein Prinzipschaltbild der CAMAC-Karte WTB II/a, welche die Messung der Drahtwiderstände durch den Vergleich mit einem Referenzwiderstand auf der Karte durchführt und das Ergebnis digitalisiert.

Die zentrale Funktionseinheit dieser Karte besteht aus zwei Konstantstromquellen I_{ref} und I_{meas} , die gemeinsam über ein Statusregister ein- und ausgeschaltet werden können. Die erste dieser Stromquellen prägt dem Referenzwiderstand einen Gleichstrom auf, die zweite einem über die Relaisbox abgeschlossenen Draht, dessen mechanische Spannung zu bestimmen ist. Die über dem Draht bzw. über dem Referenzwiderstand abfallenden Spannungen werden mit einem als Differenzverstärker geschalteten Operationsverstärker verstärkt und die resultierende Spannung mit einem 8-bit ADC digitalisiert und über den CAMAC-Bus ausgelesen.

Bei einer Messung werden zunächst die beiden Stromquellen eingeschaltet und gewartet, bis ein Indikatorbit³ im Statusregister das Erreichen des Sollstroms anzeigt. Danach werden mit Hilfe des Frequenzgenerators der WTB II/a Kontrolleinheit die für den Drahttyp vorgesehenen Anregungsfrequenzen erzeugt und bei jedem Frequenzwechsel nach dem Einschwingen des Drahtes eine Messung durchgeführt wie oben beschrieben und das Ergebnis ausgelesen.

³current indicator = Sollstrom-Anzeiger

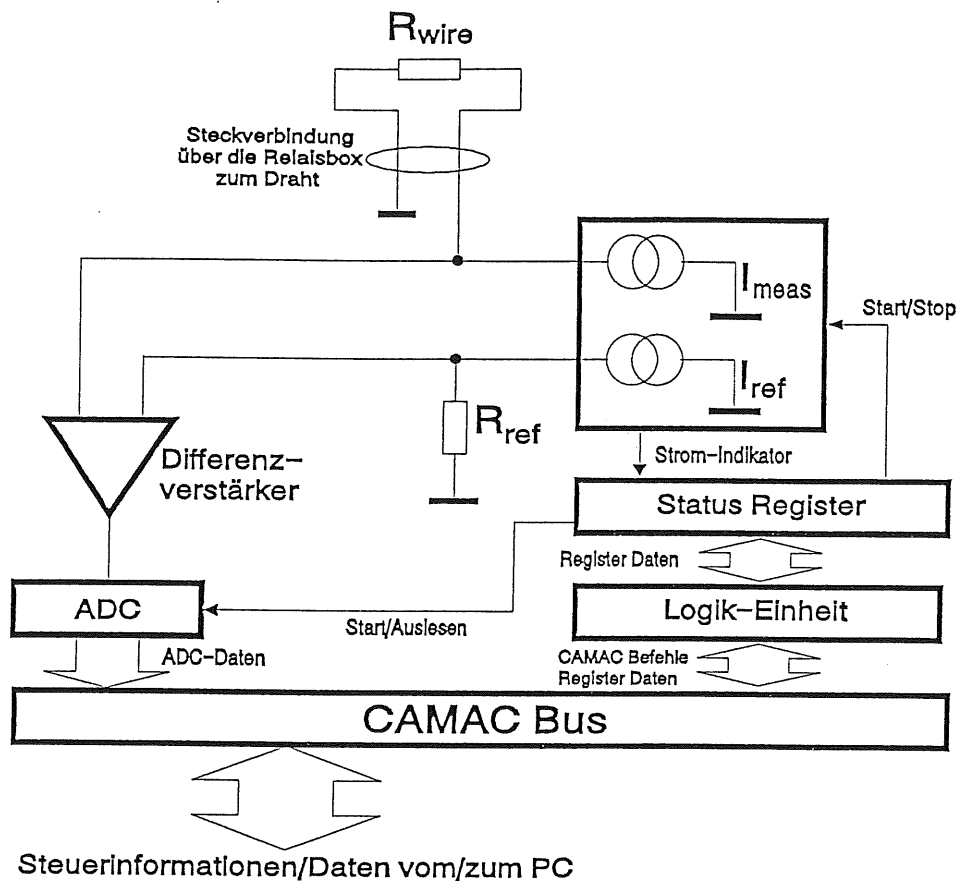


Abbildung 5.1: Blockschaltbild der Meßeinheit WTB II/a

Wie in Kapitel 6, Abschnitt 6.4 beschrieben kann dann aus dem Verlauf der ADC-Werte in Abhängigkeit von der Anregungsfrequenz die Resonanzfrequenz des Drahtes und seine Zugspannung vom Steuerprogramm bestimmt und das Ergebnis ausgegeben werden.

Da diese Karte in mehreren unterschiedlichen Versionen für die verschiedenen Drahttypen im System vorhanden ist, wurde über Lötbrücken eine 3-bit Codemarkierung realisiert, um den Kartentyp über CAMAC auszulesen und damit Fehler durch falsche Kartentypen oder falsche Zuordnung der Karte zu den Drahttypen zu vermeiden. Diese Unterscheidung ist notwendig, da z.B. die Beschaltung eines Signaldrahtes mit einem hohen Strom, etwa eines Potential- oder Kathodendrahttyps der WTB II/b Einheit auch zu einer Überhitzung und Beschädigung des Drahtes führen kann.

Eine Übersicht über die CAMAC-Kommandos für diese Karte und den Inhalt des Statusregisters findet sich in den Tabellen 5.1 bzw. 5.2. Abb. 5.2 zeigt eine Fotografie der Karte.

CAMAC-Funktion	Name	Beschreibung
$N \times F(0) \times A(0)$	Read ADC	ADC-Inhalt lesen
$N \times F(1) \times A(0)$	Read Status	Status-Register lesen
$N \times F(11) \times A(0)$	Clear Status	Status-Register löschen
$N \times F(17) \times A(0)$	Write Status	Status-Register schreiben
$N \times F(18) \times A(0)$	Start Conversion	Umwandlung starten
$N \times C$	Clear all Registers	Karte rücksetzen

Tabelle 5.1: CAMAC-Kommandos der Meßeinheit WTB II/a

Bit	Inhalt
0	Strom ein/aus
1	Sollstrom-Indikator
2	AD-Wandlung beendet
3	Kartentypkennung Bit 0
4	Kartentypkennung Bit 1
5	Kartentypkennung Bit 2

Tabelle 5.2: Status-Register der Meßeinheit WTB II/a

5.3 Die Kontrolleinheit WTB II/b

Abbildung 5.3 zeigt ein Prinzipschaltbild der CAMAC-Karte WTB II/b. Sie enthält neben einer Reihe von Registern einen Generator für Signale im Frequenzbereich von 0 bis 200 Hz, mit dem die Anregungssignale für alle Drahtsorten erzeugt werden. Das Ausgangssignal dieses Frequenzgenerators dient als Steuersignal für einen externen Hochspannungsumschalter. Der Schaltzustand des Generators (ein/aus) wird über das Statusregister gesteuert, während der zu erzeugende Frequenzwert als Binärcode in den Eingang eines D/A-Wandlers⁴ geschrieben wird. Die von diesem Baustein generierte Analogspannung wird mit einem VFC⁵ in ein Rechtecksignal umgesetzt. Das Rechtecksignal ist von der Karte nach aussen geführt und steuert über den HV-Schalter die Frequenz der anregenden Hochspannung.

Die eigentlichen Steueraufgaben der Karte sind in drei Registern ausgeführt. Diese Register enthalten die Information darüber

1. welcher Meßeinschub verwendet wird⁶,
2. welcher Draht gemessen werden soll⁷ und
3. welche(r) Draht/Drähte zur Anregung auf Hochspannung liegen⁸.

⁴DAC = Digital-to-Analog-Converter

⁵VFC = Voltage-to-Frequency-Converter

⁶CER = Current-Entry-Register

⁷CWR = Current-Wire-Register

⁸MSR = Main-Switch-Register

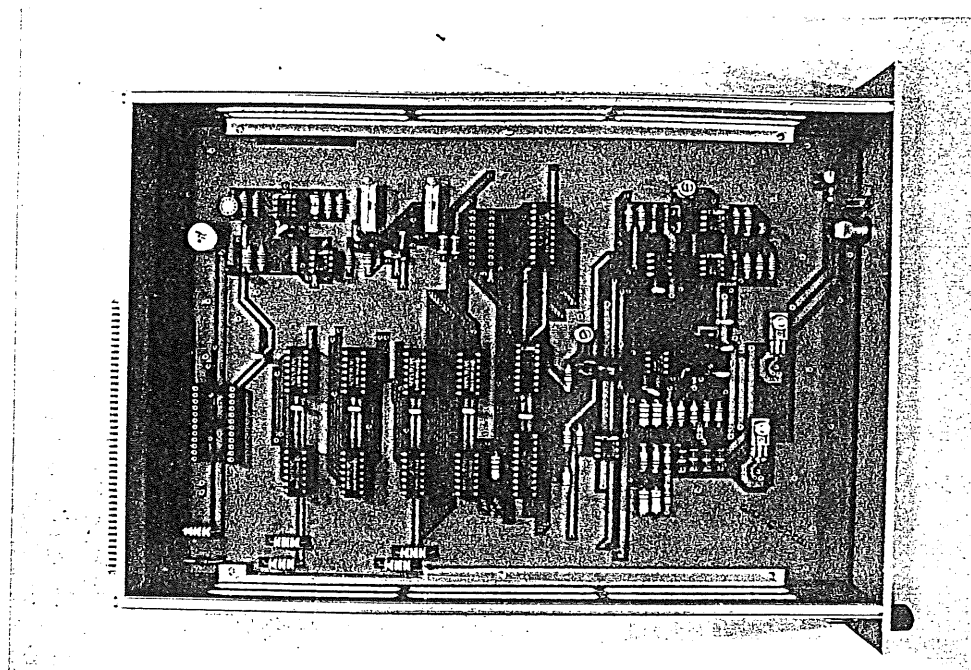


Abbildung 5.2: Photographie der Meßeinheit WTB II/a

Eine Beschreibung der Register und CAMAC-Befehle ist in den Tabellen 5.3 resp. 5.4 enthalten. Der Zustand der Register wird über eine Mehrfach-

Kürzel	Name	Beschreibung
MSR	Main Switch Register	8 Bit Register schaltet Draht von HV auf LV und umgekehrt
CER	Current Entry Register	4 Bit Register max. 1 Bit gesetzt wählt Heiz-/Meßstrom
CWR	Current Wire Register	8 Bit Register max. 1 Bit gesetzt wählt zu messenden Draht
SR	Status Register	Bit 0 = Freq ein/aus

Tabelle 5.3: Register der Kontrolleinheit WTB II/b

Steckverbindung nach aussen geführt und dient auf der Relaiskarte WTB II/c zur Ansteuerung der drei zugehörigen Relaisstufen. Die Einzelheiten dieser Ansteuerung sind in Abschnitt 5.4 wiedergegeben.

Das Setzen des Registers, welches die Auswahl des Meßstroms betrifft, hat dabei keine Auswirkungen auf den Zustand der Meßkarten, sondern bestimmt lediglich den Zustand der Relais in der Relaisbox. Die Meßkarten müssen gesondert vom Steuerprogramm ein- bzw. ausgeschaltet werden.

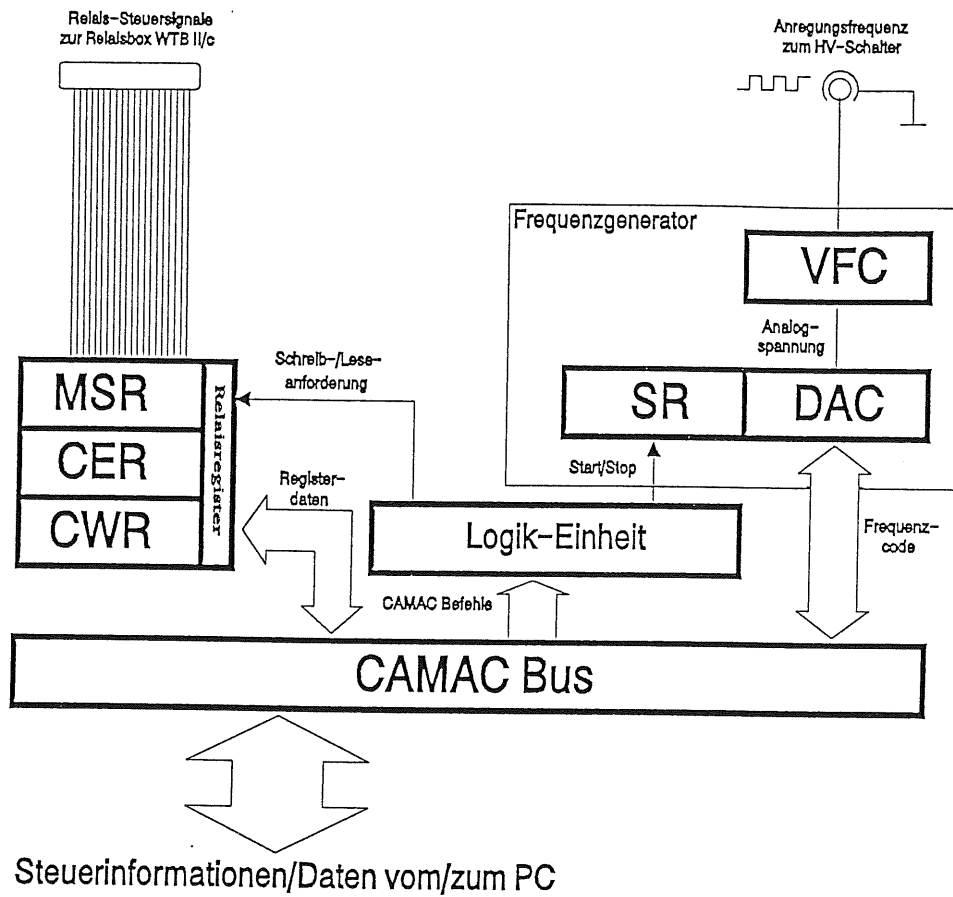


Abbildung 5.3: Blockschaltbild der Kontrolleinheit WTB II/b

Die kompletten Schaltpläne der Karte befinden sich im Anhang B; eine Photographie ist in Abb. 5.4 gezeigt.

5.4 Die Relaisbox WTB II/c

Um die (bis zu vier) verschiedenen Meßströme sowie die Hochspannung zur Anregung der Drähte auf die (maximal acht) angeschlossenen Drähte zu verteilen wurde eine externe, d.h. nicht auf dem CAMAC-Bus basierende, Relaisbox konstruiert. Die Relais werden von den drei Hauptregistern der Kontrolleinheit WTB II/b über Treiberstufen angesteuert und schalten über drei Stufen die zur Messung benötigten Spannungen auf die Drähte. Zusätzlich wurde der Anschluß einer Panik-Taste zur Unterbrechung der HV-Versorgung im Notfall vorgesehen. Der Blockschaltplan 5.5 zeigt das Zusammenwirken der drei Schaltstufen.

In der ersten Stufe steuert das CER-Register der WTB II/a-Karte vier Relais, um eine der vier möglichen Niederspannungen (bzw. Meßströme) für die Messung auszuwählen. Die zweite Stufe mit acht identischen Relais, verteilt auf zwei Module, sorgt dann, gesteuert über das CWR-Register, für die Auswahl des zu messenden Drahtes, während in der dritten Schaltstufe (vier identische

CAMAC-Kommando	Funktion
$N \times F(1) \times A(0)$	SR lesen
$N \times F(4) \times A(0)$	MSR lesen
$N \times F(6) \times A(0)$	CER lesen
$N \times F(6) \times A(1)$	CWR lesen
$N \times F(16) \times A(0)$	Frequenzwert schreiben
$N \times F(17) \times A(0)$	SR schreiben
$N \times F(20) \times A(0)$	MSR schreiben
$N \times F(22) \times A(0)$	CER schreiben
$N \times F(22) \times A(1)$	CWR schreiben
$N \times C$	alle Register rücksetzen

Tabelle 5.4: CAMAC-Befehle für die Kontrolleinheit WTB II/b

Module) einer oder mehrere der angeschlossenen Drähte zur Anregung auf Hochspannung gelegt werden. Letzteres wird über das MSR-Register gesteuert. Der Inhalt der drei Register wird über ein Flachbandkabel an den Steuerungseingang der Box geführt. Die dreistufige Form der Schaltung wurde gewählt, um ein irrtümliches Schalten des HV⁹-Eingangs auf einen oder mehrere der Niederspannungseingänge schaltungstechnisch auszuschließen. Der Anschluß der Drähte an die auf diese Weise verteilten Hoch- und Niederspannungen erfolgt über zwei getrennte Zuleitungskabel (jeweils für die rechte und linke Kammerseite) welche mit einer einfachen Mehrfach-Steckverbindung an Adapterplatinen angeschlossen werden. Diese Adapterplatinen sind so ausgeführt, daß jeweils vier Kammerdrähte gleichen Typs (Signal-, Potential- oder Kathodendrähte) zu einer Buchse gehören, sodaß eine fehlerhafte, d.h. rechts und links unterschiedliche Kontaktierung nahezu ausgeschlossen bzw. leicht zu erkennen ist.

Aufgrund der mechanischen Belastung der Relais während des Einsatzes stellt die Relaisbox eine mögliche Schwachstelle des Gesamtsystems dar. Bei der Auswahl der Relais wurde, insbesondere bei den HV-Typen, erhöhter Wert auf kleine Bauformen gelegt, um die äußeren Abmessungen der Box zu minimieren. Im Einsatz sind die Relais einer größeren Anzahl von Schaltvorgängen ausgesetzt, sodaß auch in dieser Hinsicht Mindestanforderungen bestehen. Lt. Datenblatt des Herstellers (Fa. ELFEIN) haben die verwendeten Typen eine garantierte Lebensdauer von $> 5 \cdot 10^7$ Schaltzyklen. Allerdings haben bei einem früheren Einsatz bei DESY ähnliche Relais desselben Herstellers die Angaben des Datenblattes nicht erfüllt [EHL89]. Im Rahmen der Entwicklung wurden daher alle verwendeten Relais Typen einem Dauertest von etwa 10^6 Schaltzyklen unterzogen ohne daß es zu Ausfällen gekommen ist. Bei erwarteten 10^5 Zyklen im Rahmen der Verdrahtung der CJC1 und CJC2 Driftkammern sind daher Ausfälle nicht zu erwarten. Dennoch besteht die Relaisbox aus acht Modulen in vier unterschiedlichen Typen, die die einzelnen Stufen der Schaltung repräsentieren. Auf diese Weise ist es bei Ausfällen möglich, ein Modul schnell

⁹HV = high voltage - Hochspannung

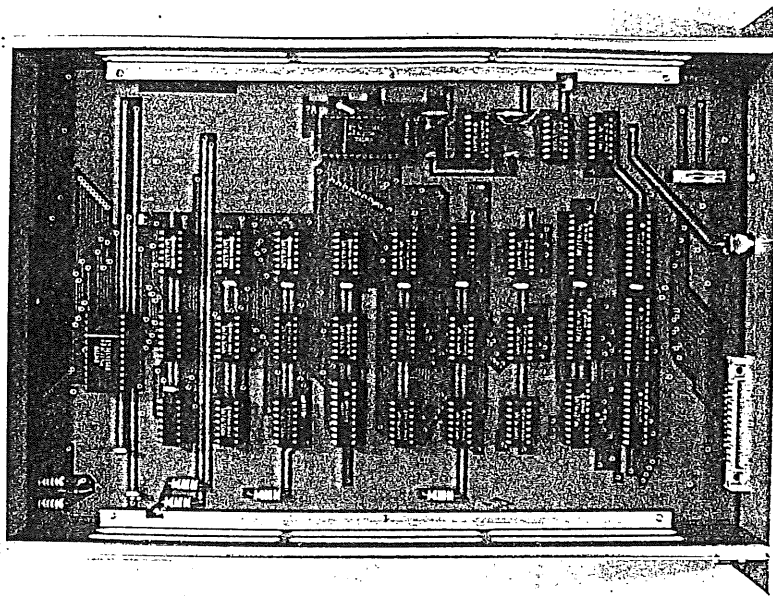


Abbildung 5.4: Photographie der Steuereinheit WTB II/b

auszutauschen. Damit kann auch im Störfall die Betriebsbereitschaft des Gesamtsystems gewährleistet werden. Abb. 5.6 zeigt die Außenansicht der Box als Photographie.

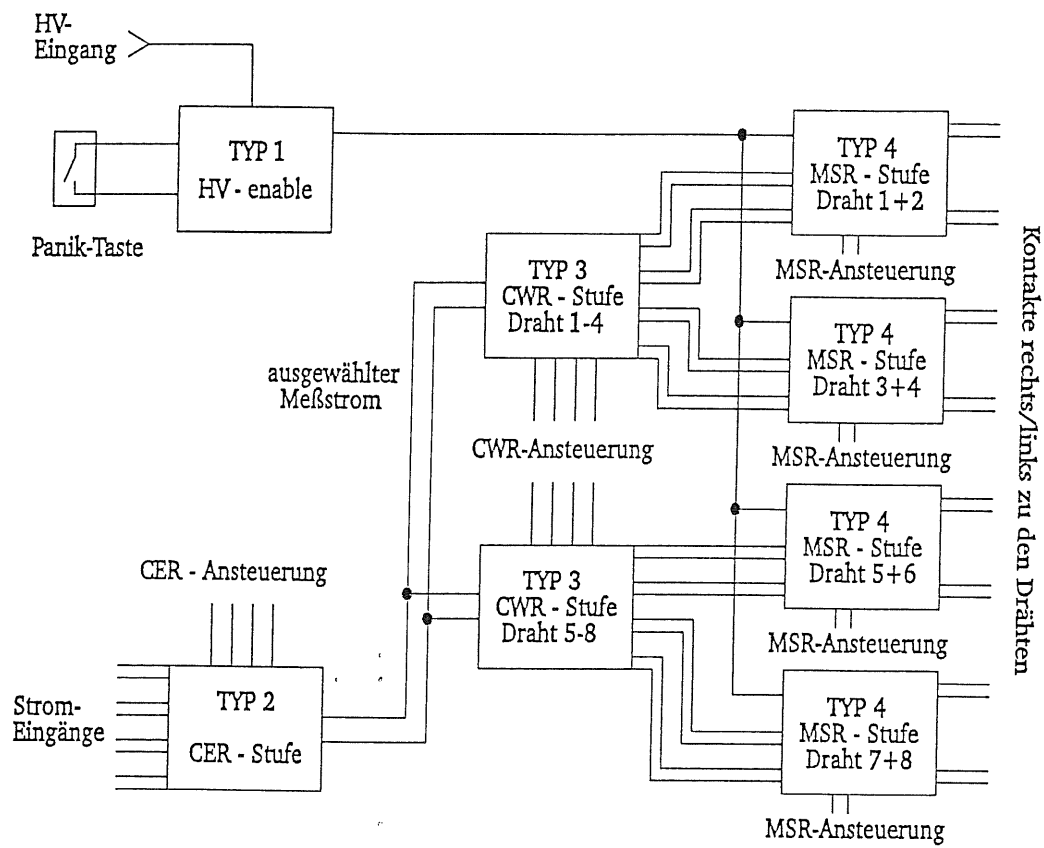


Abbildung 5.5: Blockschaltbild der Relaisbox

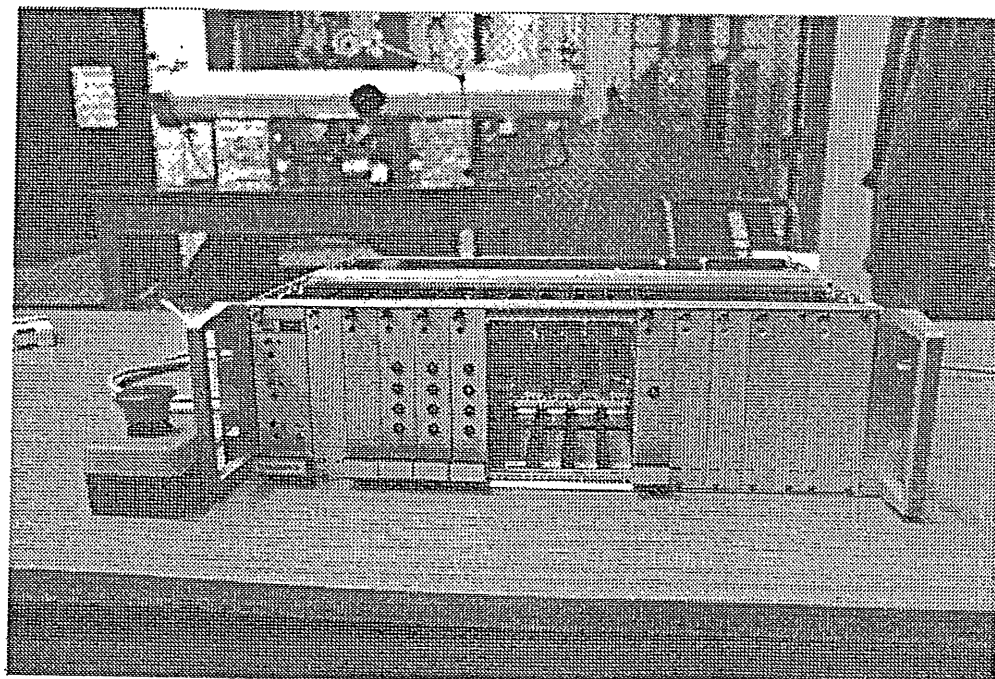


Abbildung 5.6: Photographie der Relaisbox WTB II/c

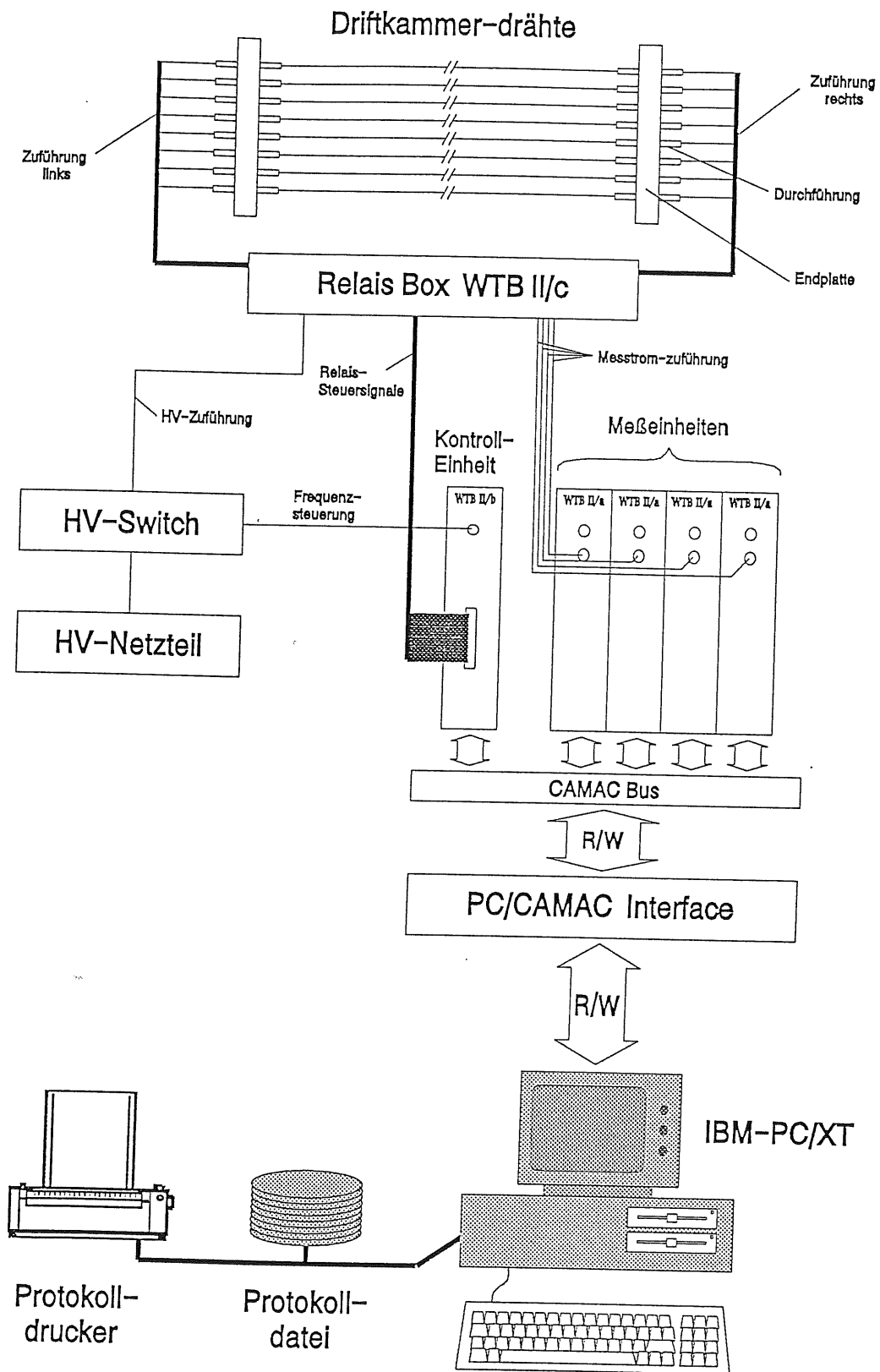


Abbildung 5.7: Blockschaltbild des WTB II - Systems

Kapitel 6

Das Kontrollprogramm WTB

5.0

In diesem Kapitel wird die Arbeitsweise des Programms beschrieben, welches sowohl die Steuerung der gesamten WTB/2-Hardware, als auch die Auswertung und Protokollierung der Ergebnisse übernimmt.

Das Kontrollprogramm WTB 5.0 läuft auf einem IBM-PC unter MS-DOS, steuert den gesamten Meßvorgang und berechnet und protokolliert die Ergebnisse. Die Bedienung läuft über einen einfachen Kommandointerpreter um zu erreichen, daß ein Benutzer mit minimalen Informationen über die Funktionsweise des Systems die erforderlichen Messungen leicht und fehlerfrei durchführen kann. Das Programm besteht aus ca. 8000 Zeilen Quellcode in Turbo-Pascal und ca. 200 Zeilen Quellcode in 8086-Assembler. In diesem Abschnitt werden vier zentrale Punkte dieses Programms kurz näher beschrieben:

- Die Bedienung und Benutzung des Programms sowie eine Zusammenfassung der von ihm berechneten und protokollierten Größen,
- eine Beschreibung des Programmablaufs einer Einzelmessung, d.h. der Messung eines einzelnen Drahtes,
- den Programmablauf bei einer Messung mehrerer Drähte zusammen mit einer Zusammenfassung der hierfür entwickelten Steuersprache und abschließend
- einige Bemerkungen darüber, wie das Programm aus den gemessenen Daten die Resonanzfrequenz und die Drahtspannung bestimmt.

Auf eine vollständige Dokumentation und den Abdruck des Programms wird aus Platzgründen verzichtet.

6.1 Bedienung und Kommandointerpreter

Die Bedienung des Programms erfolgt über einen einfachen Kommandointerpreter, der sowohl über die Tastatur eingegebene Befehle als auch mit einer

Maus über Menüs gegebene Kommandos bearbeitet. Gruppen von Kommandos können zu Kurzbefehlen (Makros) zusammengestellt werden und über einen einzigen Befehl aufgerufen werden. Tabelle 6.1 zeigt eine Übersicht über die verfügbaren Kommandos. Um eine möglichst hohe Flexibilität zu erreichen,

WTB 5.0 Kommando	Beschreibung
allgemeine Kommandos	
EXIT	Programm beenden
EDIT/VIEW	Makro/Meßprogramm ansehen oder ändern
HELP	Hilfstext anzeigen
MENU	auf Menübetrieb umschalten
SAVE/LOAD	Programm- oder Drahtparameter sichern oder laden
DEFINE	interne Makros definieren
GRAPH	einen Datenpuffer graphisch darstellen
EX	externes Makro ausführen
DO	Meßprogramm ausführen
SET	Programmparameter setzen
spezielle Kommandos für Messungen	
SET	Relaisregister setzen
READ	Messung für Drahtsorte durchführen

Tabelle 6.1: WTB 5.0 Kommandoübersicht (Auszug)

werden auch die Meßprogramme als Makros definiert. Die Ergebnisse der letzten acht Messungen werden im Hauptspeicher gehalten und können auch nachträglich in beliebiger Reihenfolge abgerufen werden. Die Darstellung der Meßergebnisse erfolgt automatisch oder auf Anforderung in textlicher und graphischer Form. Die errechneten Daten (Resonanzfrequenz, Drahtspannung) werden zusammen mit Datum und Uhrzeit sowie einer Beurteilung (Draht ok./nicht ok.) sowohl auf einem Drucker als auch in einer Datei protokolliert um Kontrollen und statistische Untersuchungen zu ermöglichen.

Es folgt eine Übersicht über die vom System zur Messung, Berechnung und Auswertung benötigten Parameter.

- Zur Berechnung der wahren Drahtspannung aus der gefundenen Resonanzfrequenz werden die mechanischen Parameter des Drahtes und der Kammer benötigt. Es handelt sich dabei um den **Drahtdurchmesser** und die **Dichte** des Drahtmaterials. Hinzu kommt der **Korrekturfaktor** k_{wire} , mit dem die thermisch Ausdehnung des Drahtes im Verlauf der Messung kompensiert wird (siehe Abschnitt 4.4.2). Diese Werte sind für die Drahtsorten unterschiedlich und werden daher zu einem Satz von

Drahtparametern für das Programm zusammengefaßt. Die in die Berechnung ebenfalls eingehende **Drahtlänge** hingegen ist für alle Drähte gleich und wird gesondert als Parameter gehalten.

- Zur Beurteilung des Ergebnisses braucht man den **Sollwert der Drahtspannung** sowie eine Angabe über die erlaubte **Toleranz**. Diese Werte variieren für unterschiedliche Drahtsorten und können daher ebenfalls zu den Drahtparametern gerechnet werden.
- Zur Durchführung von Messungen werden die Werte für die **Startfrequenz**, die **Schrittweite** eines Frequenzschrittes sowie Angaben über die **Wartezeit** beim ändern der Frequenz benötigt. Diese Wartezeit ist notwendig, um die Einschwingdauer des Drahtes zu überbrücken und damit eine Verfälschung des Ergebnisses zu vermeiden. Diese Werte gehören ebenfalls zu den Drahtparametern.
- Damit das System die vorgetellte Hardware bedienen kann werden die **CAMAC-Adressen** aller verwendeten Einschübe benötigt.

6.2 Ablauf einer Einzelmessung

Abb.6.3 zeigt schematisch den Ablauf der Messung eines einzelnen Drahtes, wie er vom Programm durchgeführt wird. Vor dieser Messung müssen die Relais der Relaisbox über die Register MSR, CER und CWR entsprechend den Anforderungen der Messung geschaltet werden. Dieser Vorgang ist die Hauptaufgabe eines in Abschnitt 6.3 beschriebenen Meßprogramms.

Bei einer Messung wird nach einer simplen Konsistenzprüfung der Draht- und Meßparameter zunächst der zum Draht gehörige Meßstrom eingeschaltet und in einer Schleife das Erreichen des Sollstromes und der gewünschten Aufheizung abgewartet. Dieser Strom bleibt während der gesamten Messung eingeschaltet. Sollte der Sollstrom nach der festgelegten Wartezeit noch nicht erreicht sein, kann davon ausgegangen werden, daß an der zu messenden Position kein Draht vorhanden ist und die Messung wird abgebrochen. Die Drahtparameter (sowohl für die Messung als auch für die Berechnung der Resonanzfrequenz) sind für jeden Drahttyp in einem speicherresidenten Datensatz vorhanden, welcher jederzeit vom Benutzer geändert oder neu beschrieben werden kann. Dazu gehören (für die Messung) Startfrequenz der Anregung, Schrittweite und Schrittzahl sowie (für die Berechnung) der Drahtdurchmesser, die Dichte und der erlaubte Fehler.

Vor Beginn der Messung werden Anregungsfrequenz und Schrittzähler initialisiert, d.h. auf die Startfrequenz bzw. auf 0 gesetzt. Dann wird die Erzeugung der Anregungsfrequenz durch die WTB II/b - Einheit gestartet und nach dem Einschwingvorgang die Digitalisierung gestartet und der ADC-Wert ausgelesen. Alle ausgelesenen ADC-Werte werden zusammen mit den zugehörigen Anregungsfrequenzen in einer Tabelle zwischengespeichert und dienen später

zur Berechnung der Resonanzfrequenz. Nach dem Auslesen werden die Anregungsfrequenz und der Schrittzähler inkrementiert und die Messung mit der nächsten Anregungsfrequenz fortgesetzt. Die Meßschleife wird beendet sobald die vorgesehene Schrittzahl erreicht ist.

Nachdem alle Meßwerte ausgelesen sind, werden der Frequenzgenerator und der Meßstrom abgeschaltet und die Resonanzfrequenz aus der Meßwerttabelle berechnet. Die so gefundene Resonanzfrequenz wird mit Hilfe der in Abschnitt 4.4.2 gefundenen Werte auf die 'wahre', d.h. nicht durch Temperaturerhöhung verschobene, Resonanzfrequenz korrigiert und die Drahtspannung aus den Meßdaten sowie den Draht- und Kammerparametern berechnet. Im Anschluß daran werden die Meßergebnisse (Resonanzkurve, Resonanzfrequenz) und die daraus berechnete Drahtspannung in graphischer und textlicher Form ausgegeben und abgespeichert sowie ggf. eine Fehlermeldung ausgegeben falls die Abweichung der Istspannung vom Sollwert die Fehlergrenze überschreitet oder ein anderer Fehler aufgetreten ist.

6.3 Ablauf einer Messung mehrerer Drähte

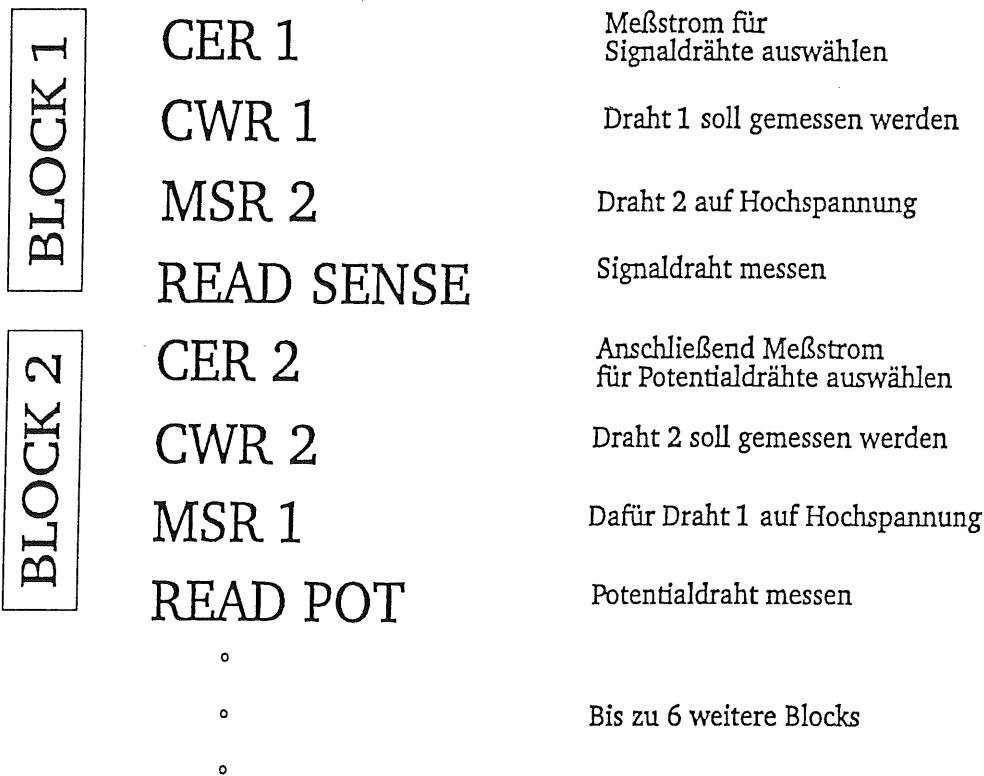


Abbildung 6.1: Beispiel eines Meßprogramms

Der Ablauf einer Messung mehrerer Drähte ist aus Gründen der Flexibilität nicht im Programm festgelegt sondern kann vom Benutzer frei vereinbart werden. Dazu muß eine Kommandodatei aus Befehlen aufgebaut werden, wie sie in Abschnitt 6.1 vorgestellt wurden. Es besteht somit eine einfache Möglichkeit, neue Meßabläufe, etwa für neue Drahtkonfigurationen, festzulegen, ohne in das Steuerprogramm selbst einzugreifen. Abbildung 6.1 zeigt einen kurzen Ausschnitt aus einem Meßprogramm anhand dessen ein solcher Ablauf hier kurz erläutert werden soll.

Sobald ein Meßprogramm gestartet wird, wird zunächst der Meßdatenpuffer gelöscht und damit alle Daten von vorausgegangenen Meßreihen. Die Aufgabe eines Programms besteht darin, zunächst Registerkombinationen der WTB II/b Einheit so festzulegen, daß für einen zu messenden Draht ein Meßstrom über das CER-Register, der Draht selber über das CWR-Register und ein oder mehrere Nachbardrähte für die anregende Hochspannung über das MSR-Register ausgewählt wird. Anschließend an diese Festlegungen folgt der Befehl zur Messung der mechanischen Spannung dieses Drahtes, wie sie in Abschnitt 6.2 beschrieben wurde. Dabei ist darauf zu achten, daß der Auslesebefehl an diejenige Meßkarte geht, die mit dem CER-Register ausgewählt wurde. Ein Meßprogramm besteht aus bis zu acht solcher Sequenzen für die (bis zu acht) angeschlossenen Drähte.

6.4 Auffinden der Resonanzfrequenz

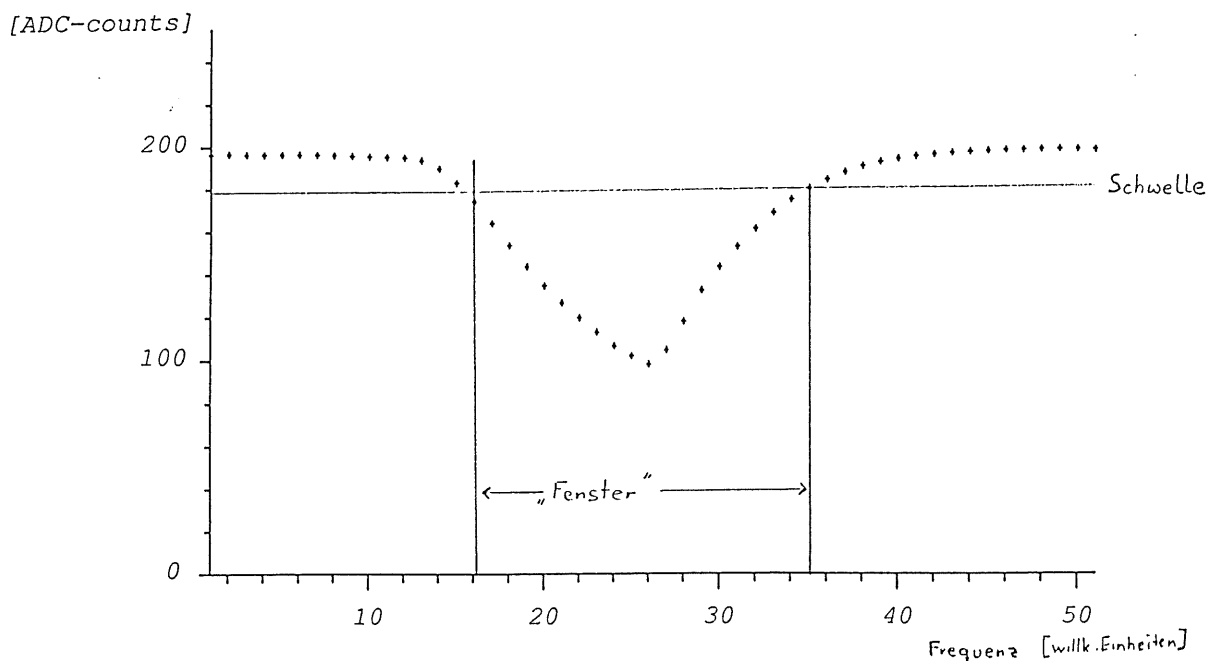


Abbildung 6.2: Darstellung einer mittleren Meßreihe

In diesem Abschnitt soll kurz erläutert werden, wie das Programm aus den gemessenen ADC-Daten die Resonanzfrequenz bestimmt, aus der dann im weiteren die wahre Drahtspannung berechnet wird.

Bei der Berechnung der Resonanzfrequenz aus der gewonnenen Meßreihe muß

aus Zeitgründen auf eine möglichst rasche Durchführung Wert gelegt werden. Als geeignetes Verfahren hat sich dabei die Berechnung des Schwerpunktes der Verteilung über ein 'Fenster' mit

$$P_{res} = \frac{1}{I} \sum_{Fenster} i(t - A(P_i)); I = \sum_{Fenster} (t - A(P_i))$$

erwiesen, wobei t ein noch zu findender Schwellenwert, $A(P_i)$ der ADC-Wert des Meßpunktes P_i und P_{res} die Position des Schwerpunktes in Bezug auf den Index i der Meßreihe darstellt. Die (unkorrigierte) Resonanzfrequenz f_{res} des Drahtes in Hertz ergibt sich dann zu

$$f_{res} = f_0 + (P_{res} - 1)\Delta f,$$

(f_0 Startfrequenz der Messung, Δf Schrittweite). Anschließend wird mit dem, durch die Änderung der Drahttemperatur im Verlauf der Messung notwendigen, drahtsortenabhängigen Korrektorfaktor k_{wire} (siehe Abschnitt 4.4.2) auf die 'wahre' Resonanzfrequenz korrigiert:

$$f'_{res} = k_{wire} f_{res}.$$

Abb. 6.2 zeigt eine mittlere Meßreihe für einen Draht mit eingezeichneter Schwelle und ebenso eingezeichnetem Fenster. Diese Meßreihe entstand durch Mittelung über ca. 100 einzelne Meßreihen, deren Schwerpunkte nach einer Normierung übereinander gelegt wurden. Als erster Schritt der Berechnung erfolgt eine einfache Ausgleichsrechnung, wobei jeder Meßwert durch den Median aus ihm selbst und den beiden Nachbarn ersetzt wird. Der Schwellenwert wird zunächst so bestimmt, daß jeweils ca. 50 % der ausgeglichenen Meßwerte oberhalb und unterhalb der Schwelle liegen. Um die Grenzen des Berechnungsfensters zu erhalten wird dann, ausgehend vom kleinsten Wert der ausgeglichenen Verteilung solange nach rechts bzw. links gegangen, bis die Werte die gefundene Schwelle überschreiten. Im Verlauf der in Kapitel 8 beschriebenen Testmessungen wurde festgestellt, daß auf diese Weise im Mittel 9 Werte innerhalb des Fensters liegen. Über alle so gefundenen Werte wird dann die Schwerpunktbildung, wie oben beschrieben, durchgeführt.

Um für einen späteren Zeitpunkt die Zuordnung Meßwert/Draht zu erhalten, etwa bei einer Nachmessung oder dem späteren Austausch eines Drahtes, werden zu Beginn jeder Messung bzw. die Position der Adapterplatinen (Zellen-Nr.) und der Adapterstecker (Drahtnummern) als Kode abgefragt und zusammen mit den Meßwerten und den Abweichungen vom Sollwert in der Protokoll-datei gesichert.

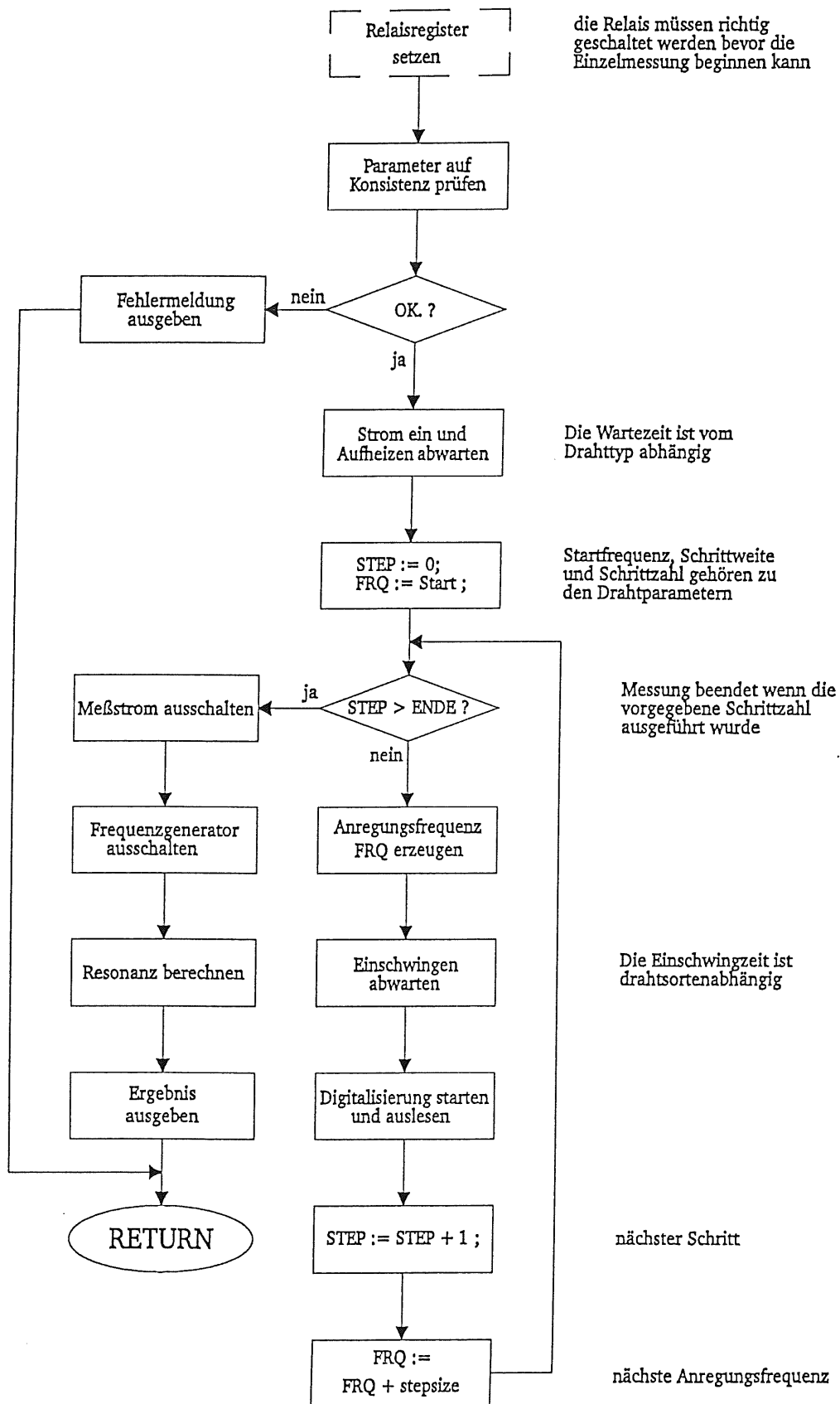


Abbildung 6.3: Flußdiagramm einer Einzelmessung

Kapitel 7

Fehlerabschätzung

Bei der Abschätzung der Fehler des Verfahrens sind vier Punkte zu berücksichtigen:

- Systematische Fehler der Hardware
Der Digitalisierungsfehler der ADC-Bausteine sowie die Frequenzgenauigkeit des Frequenzgenerators, der die Anregungsfrequenzen erzeugt, gehen in die Berechnung der Resonanzfrequenz ein.
- Systematische Fehler der Software
Durch das verwendete Verfahren zur Berechnung der Resonanzfrequenz entstehen ebenfalls systematische Fehler.
- Statistische Fehler der Messung
Diese entstehen insbesondere durch die schwer quantitativ zu erfassenden äußeren Bedingungen (z.B. Luftbewegungen) im Verlauf einer Messung.
- Systematische Fehler der Materialparameter
Hier spielt der Fehler der Drahtdurchmesser eine entscheidende Rolle. Wie gezeigt wird, begrenzt er durch seinen relativ großen Fehler die Präzision, mit der der absolute Wert der mechanischen Drahtspannung aus einer Resonanzmessung bestimmt werden kann.

Im folgenden werden aus der Anwendung des Fehlerfortpflanzungsgesetzes Abschätzungen über den zu erwartenden Fehler in der gemessenen Drahtspannung hergeleitet. Die ersten beiden der genannten Punkte werden dabei gemeinsam berücksichtigt.

7.1 Systematische Fehler von Hard- und Software

Der Digitalisierungsfehler ΔD der verwendeten ADC-Bausteine¹ wird vom Hersteller mit

$$\Delta D = \pm 1 \text{ LSB}$$

¹Hersteller : National Semiconductor, Typbezeichnung : ADC0800/8-bit

angegeben. Der auf der WTB II/b - Einheit realisierte Frequenzgenerator weist (im verwendeten Meßbereich von 10 – 100 Hz) einen relativen Frequenzfehler $\frac{\Delta\nu}{\nu}$ von

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = 1.5 \cdot 10^{-3}$$

auf. Auf das zur Resonanzfindung verwendete Schwerpunktverfahren (siehe Abschnitt 6.4) wird das Fehlerfortpflanzungsgesetz angewandt: (f Resonanzfrequenz, ν Anregungsfrequenz, D Schranke - Digitalwert, b Fensterbreite)

$$f = \frac{\sum \nu D}{\sum D}$$

$$\Rightarrow \Delta f = \frac{\partial f}{\partial \nu} \Delta \nu + \frac{\partial f}{\partial D} \Delta D$$

$$= \Delta \nu + \frac{\sum \nu \sum D + b \sum \nu D}{(\sum D)^2} \Delta D.$$

Die Summen müssen dabei über das Fenster berechnet werden. Zur Abschätzung wurden sie aus dem gemittelten Resonanzverlauf (siehe Abb. 6.2) bestimmt, und zwar über ein Fenster der Breite $b = 9$ um die Resonanzfrequenz:

$$\begin{aligned} \sum \nu &= 234 \\ \sum D &= 743.33 \\ \sum \nu D &= 19147.18 \end{aligned}$$

Daraus folgt der Fehler Δf der Resonanzfrequenz:

$$\Delta f = \Delta \nu + 0.003 \cdot \Delta D = 0.042$$

Dies bedeutet bei einer Resonanzfrequenz von $f = 26.2$ einen relativen Fehler von

$$\frac{\Delta f}{f} = 1.6 \cdot 10^{-3}.$$

Der Einfluß dieses Fehlers auf die berechnete Drahtspannung kann dann ebenfalls leicht bestimmt werden: (ρ Dichte, L Drahtlänge, d Drahtdurchmesser)

$$\begin{aligned} \text{mit } F &= \pi \rho L^2 d^2 f^2 \\ \text{und } \Delta F &= \frac{\partial F}{\partial f} \Delta f \\ \text{folgt } \frac{\Delta F}{F} &= 2 \cdot \frac{\Delta f}{f}, \end{aligned}$$

Der sich ergebende relative Fehler der Drahtspannung mit den genannten Werten ist dann

$$\frac{\Delta F}{F} = 3.2 \cdot 10^{-3} \hat{=} 0.32\%.$$

7.2 Statistische Fehler bei der Messung

Betrachtet man einzelne Meßreihen, die im Rahmen der Testmessungen aufgenommen wurden, stellt man fest, daß der ausgelesene Digitalwert D eine Schwankungsbreite von ca. $\Delta D = \pm 5$ LSB aufweist. Dieser Wert konnte selbst unter sehr günstigen Bedingungen nicht unterschritten werden (z.B. abgeschirmt) und entspricht einer momentanen Temperaturänderung von ca. 0.2 K.

Wendet man das Fehlerfortpflanzungsgesetz analog zu 7.1 an und ersetzt dabei den Digitalisierungsfehler des ADC's durch die Schwankungsbreite, so erhält man den sich aus diesen statistischen Fluktuationen ergebenden relativen Fehler der berechneten Drahtspannung:

$$\frac{\Delta F}{F} = 4.1 \cdot 10^{-3} \hat{=} 0.41\%$$

7.3 Systematische Fehler durch die Materialparameter

Die in den vorausgegangenen Abschnitten abgeschätzten Werte stellen den Fehler dar, der durch die Arbeitsweise der Meßapparatur entsteht. In die Berechnung der Drahtspannung gehen neben den dort berücksichtigten Größen auch noch die Materialparameter des Drahtes (Durchmesser d und Dichte ρ) sowie die Drahtlänge L ein. Während die Fehler von ρ und L vernachlässigbar sind, wird der Fehler im Drahtdurchmesser Δd vom Hersteller mit $\Delta d = \pm 2\%$ angegeben. Dieser hohe Wert resultiert im Wesentlichen aus der Änderung des Lochdurchmessers durch Abnutzung beim Drahtziehen. Es handelt sich dabei also nicht um einen statistischen, sondern um einen systematischen Fehler und die angegebenen Toleranzen stellen Schranken dar, welche nicht überschritten werden. Es ist daher durchaus möglich, daß eine gesamte Drahtrolle am oberen oder unteren Rand der Toleranz ist, d.h. innerhalb der Grenzen sind alle Werte möglich. Berechnet man die Fehlerfortpflanzung dieser Werte, dann resultiert daraus ein relativer Fehler der berechneten Zugspannung von

$$\frac{\Delta F}{F} = 2 \cdot \frac{\Delta d}{d} = 0.04 \hat{=} 4\%,$$

d.h. genauer als ca. 4% kann die mechanische Drahtspannung aus der Resonanzfrequenz nicht bestimmt werden, wenn der Istwert des Drahtdurchmessers nicht besser bekannt ist, d.h. zusätzlich bei jeder Rolle gemessen wird. Dies ist jedoch insofern nicht notwendig, da das Ziel einer Messung der Drahtspannung darin besteht, die geforderte Feldqualität über einen gleichmäßigen Durchhang aller Drähte zu gewährleisten. Der Absolutwert der Drahtspannung spielt dabei die untergeordnete Rolle gegenüber den relativen Werten der Einzeldrähte zueinander. Auswirkungen des genannten hohen Fehlers auf die Feldqualität der Jetkammern könnten sich nur dann ergeben, wenn z.B. innerhalb einer Kammer die Drahtrolle gewechselt wird. In diesem Fall wäre ein Vergleich der Drahtdurchmesser beider (oder aller) verwendeten Rollen wünschenswert.

Kapitel 8

Testmessungen

Um die Funktionsweise der vorgestellten Meßapparatur in der Praxis zu überprüfen, wurden eine Reihe von Testmessungen mit unterschiedlichen Zielsetzungen durchgeführt. Die Resultate dieser Messungen werden in diesem Kapitel zusammengefaßt.

Das Kapitel gliedert sich in zwei Teile. Im ersten Teil werden Messungen an einem Prototyp der CJC-Driftkammern beschrieben. Ziel der Messungen war es, die Drahtspannungen in dieser Kammer zu überprüfen und dabei gegebenenfalls Schwächen der Apparatur oder des Verfahrens zu festzustellen und zu korrigieren. Der zweite Abschnitt beschäftigt sich mit Testmessungen an einzelnen Drähten, wobei insbesondere die Präzision und die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse Ziel der Messungen waren.

In beiden Fällen wurden die Originaldrähte verwendet, wie sie für die Verdrahtung der CJC-Driftkammern vorgesehen sind. Ihre Parameter wurden bereits in Tabelle 3.1 auf Seite 18 vorgestellt. Alle Messungen wurden bei einer Schrittweite von 0.2 Hz in der Anregungsfrequenz durchgeführt. Die anderen bei den Messungen verwendeten Einstellungen der Meßapparatur werden im jeweiligen Unterabschnitt angegeben. Die Dauer einer Einzelmessung beträgt ca. 15 s für einen Signaldraht bzw. ca. 25 s für einen Potentialdraht (wesentlich bedingt durch die längere Aufheizzeit).

8.1 Testmessungen am Full-Size-Prototyp

Um die Eigenschaften der Kammergeometrie im Meßbetrieb zu testen und mögliche Fehlerquellen beim Bau der Kammer kennenzulernen wurde ein Prototyp der zentralen Driftkammern konstruiert. Dieser Prototyp besteht aus drei Zellen mit jeweils 24 Signal- und 50 Potential- und Kathodendrähten und stellt damit einen Ausschnitt aus der CJC1 mit Originalabmessungen und -geometrie dar (siehe Abb.8.1). Während der Montage dieser Testkammer konnten unterschiedliche Verfahren beim Spannvorgang und deren Auswirkungen auf die Drahtspannung untersucht werden.

Da zum Zeitpunkt der Verdrahtung ein kompletter Aufbau der in dieser Arbeit

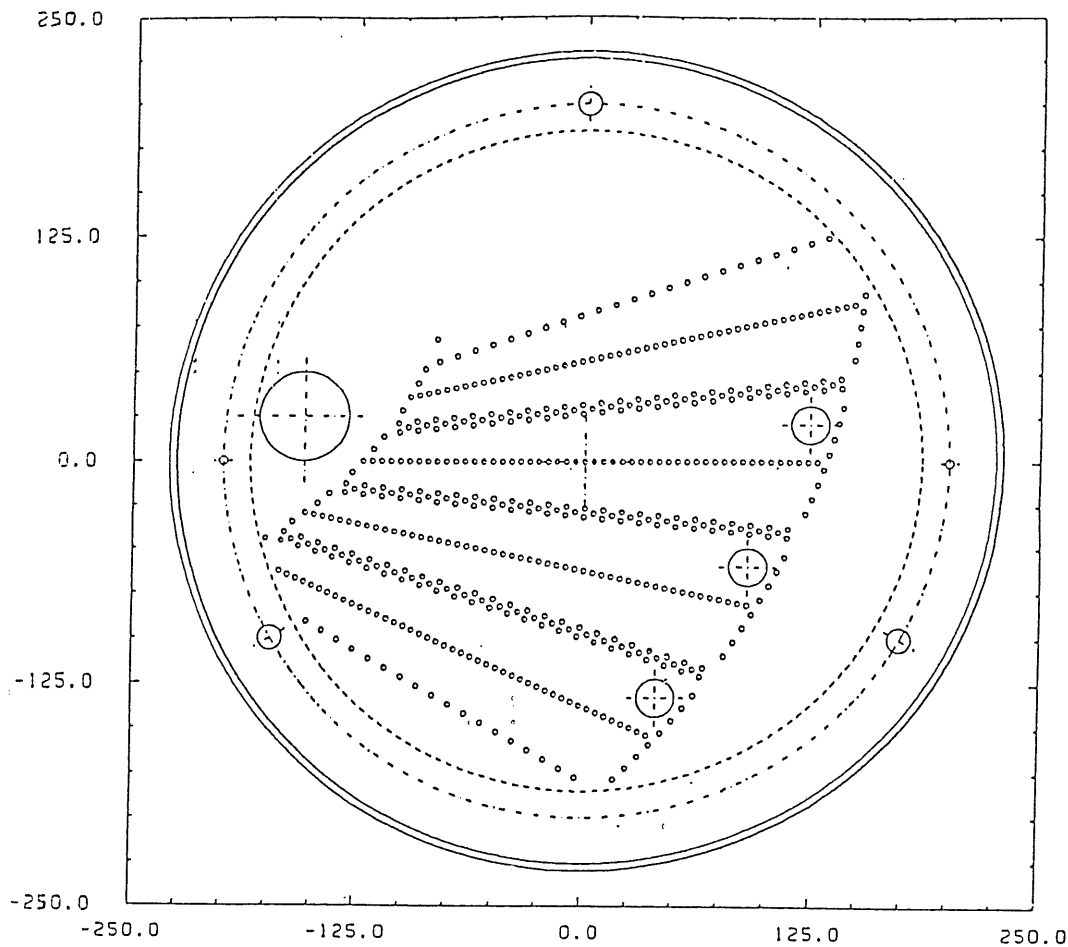


Abbildung 8.1: Endplatte des Full-Size-Prototyp

vorgestellten Apparatur noch nicht zur Verfügung stand, wurde für die Drahtspannungsmessungen am FSP¹ eine leicht modifizierte Version des Vorläufers der WTB II verwendet. Diese Version entspricht in ihren wesentlichen Funktionselementen dem endgültigen Aufbau, abgesehen von der Möglichkeit, mehrere Drähte gleichzeitig zu vermessen. Das Steuer- und Auswerteprogramm hingegen sind identisch mit dem in Kapitel 6 beschriebenen. Die bei den Messungen verwendeten Parameter der Meßapparatur sind in Tabelle 8.1 zusammengestellt.

Bei den Messungen wurde zunächst festgestellt, daß mit den ursprünglich vorgesehenen Stromstärken die Resonanzfrequenzen (insbesondere der Potentialdrähte) häufig nicht korrekt bestimmt wurde. Dies konnte darauf zurückgeführt werden, daß der Spannvorgang in einem Staubzelt abläuft, in dem eine Lüftungsanlage für einen gleichmäßigen Luftstrom sorgt. Dadurch werden an den Drähten leicht lokale Turbulenzen erzeugt, die den Draht lokal zusätzlich kühlen und damit die Messung stören. Obwohl das Minimum im Verlauf der Meßwerte zum Teil optisch zu erkennen war, wurden vom Programm häufig durch Turbulenzen erzeugte Nebenminima gefunden und als Resonanzfrequenz identifiziert. Auf den Luftstrom kann jedoch nicht verzichtet

¹full-size-prototype

	Signaldrähte	Potentialdrähte
Heizstrom [mA]	25.0	400.0
Wartezeit/Heizen [s]	0.4	1.5
Wartezeit/Einschwingen [s]	0.1	0.2
Korrekturfaktor	1.00	1.05

Tabelle 8.1: Messungen am FSP — Apparaturparameter

werden, da sich sonst Staubpartikel auf den Drähten absetzen, der die korrekte Funktion der Kammer stören würde. Obwohl zur Abschirmung des Luftstroms während der Messung im Betrieb im Staubzelt eine abrollbare Abschirmung angebracht war, hat sich gezeigt, daß die Messung der Potentialdrähte erheblich gestört wurde. Die Signaldrähte hingegen wurden selbst ohne Abschirmung nicht so stark gestört, daß eine Messung unmöglich wurde. Eine Messung an einem Potentialdraht hingegen war ohne Abschirmung nicht durchführbar. Dieser Effekt kann dadurch erklärt werden, daß die Potentialdrähte gegenüber den Signaldrähten eine wesentlich größere Oberfläche besitzen. Der Wärmeübergang Q vom Draht in die umgebende Luft hängt jedoch außer vom Temperaturunterschied ΔT und von dem im Wesentlichen nur materialabhängigen Wärmeübergangskoeffizienten α lediglich von der verfügbaren Kühlfläche A_0 ab:

$$Q = \alpha \Delta T A_0.$$

Um diesen Effekt auszugleichen wurde der Heizstrom für die Potentialdrähte von 400 mA für alle nachfolgenden Messungen auf 800 mA erhöht, um ausgeprägtere Hauptminima zu erreichen. Nach dieser Modifikation waren selbst bei wesentlich ungünstigeren äußeren Bedingungen Messungen erfolgreich durchführbar, wie im folgenden Abschnitt beschrieben wird.

Die mechanischen Spannungen aller Signal- und Potentialdrähte des FSP wurden nach dem Spannen mit dem oben beschriebenen Aufbau bestimmt. Man erwartet eine asymmetrische Verteilung der Drahtspannungen wie sie in Abb. 8.2 skizziert dargestellt ist. Die systematische Verschiebung der Drahtspannungen zu niedrigeren als der Sollspannung rührt daher, daß alle Parameter, welche die Spannung beeinflussen (Reibung im Crimpteil, an der Rolle etc.), zu Kräften führen, die der angelegten Zugspannung entgegenwirken. Die Abbildungen 8.4 und 8.3 zeigen die Verteilungen der wahren Drahtspannungen, wie sie mit dem System bestimmt wurden (48 Signaldrähte bzw. 150 Potentialdrähte). Dabei ist auffällig, daß die Abweichung der wahren Drahtspannung vom Sollwert bei beiden Drahtsorten häufig außerhalb der Toleranzen von ca. 10 % liegt. Dies kann darauf zurückgeführt werden, daß die Reibung der Drähte innerhalb der Crimpteile höher ist als erwartet. Um diese Abschätzung zu überprüfen wurde bei den restlichen 24 Signaldrähten das Spannverfahren leicht modifiziert. Der Draht wurde dabei zunächst mit einem um 25 g höheren Gewicht gespannt. Wenn dann das zusätzliche Gewicht vor dem Crimpen wieder entfernt wird, zieht sich der Draht leicht zusammen wobei dann die Reibung im Crimpteil

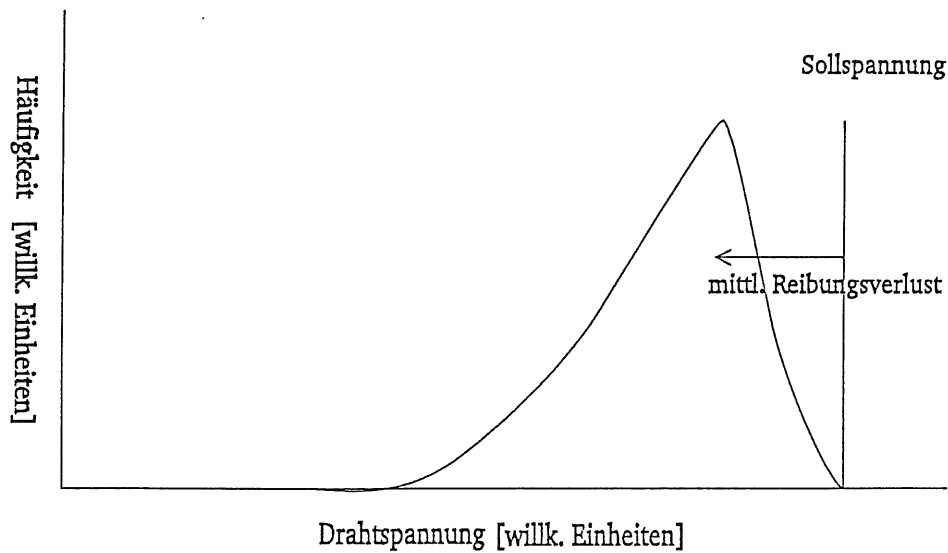


Abbildung 8.2: Skizze der erwarteten Verteilung der wahren Drahtspannungen

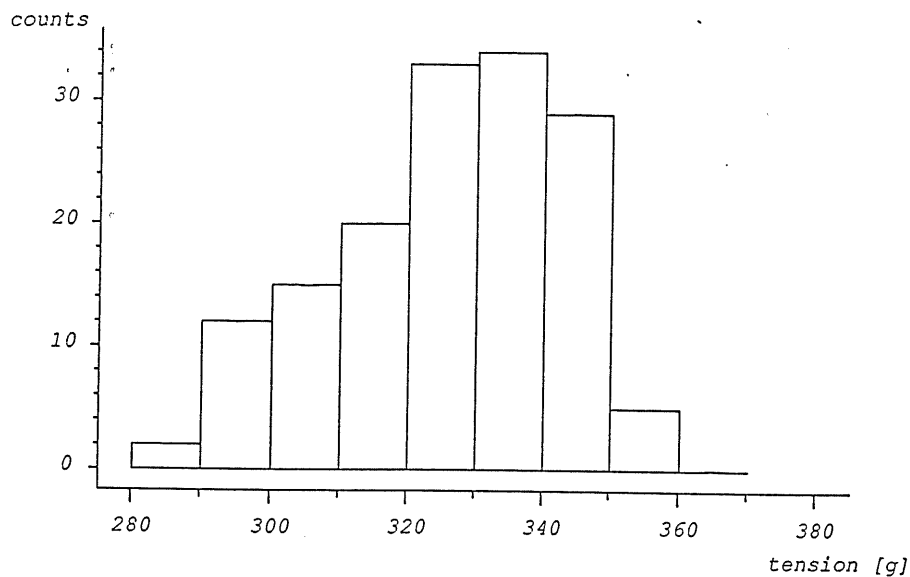


Abbildung 8.3: Drahtspannungsverteilung Potentialdrähte

und an der Rolle zu zusätzlichen Kräften führt, welche die gleiche Richtung haben wie die durch das Spanngewicht ausgeübte Kraft. Dabei sollten sich dann gegenüber der Sollspannung leicht erhöhte Drahtspannungen ergeben. Diese Erwartung wird in Abb. 8.5 bestätigt, wo die Drahtspannungsverteilung der mit dem modifizierten Spannverfahren gespannten Drähte gezeigt ist. Dieses Verfahren birgt jedoch wesentlich höhere Fehlermöglichkeiten, da dabei die resultierende Zugspannung der Drähte von der Art und Weise abhängt, wie das Zusatzgewicht angebracht bzw. entfernt wird. Es scheint daher empfehlenswert, statt dessen das gesamte Spanngewicht zu erhöhen und so die Reibungsverluste zu kompensieren. Eine Erhöhung der Gewichte um ca. 70 g für die Potentialdrähte bzw. 8 g für die Signaldrähte kann aus den Messungen abgeleitet werden.

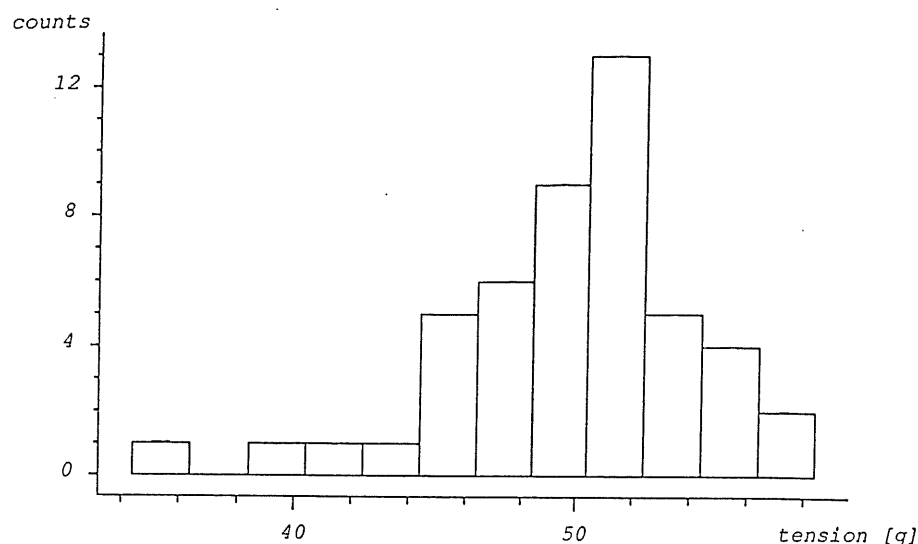


Abbildung 8.4: Drahtspannungsverteilung Signaldrähte 1-48

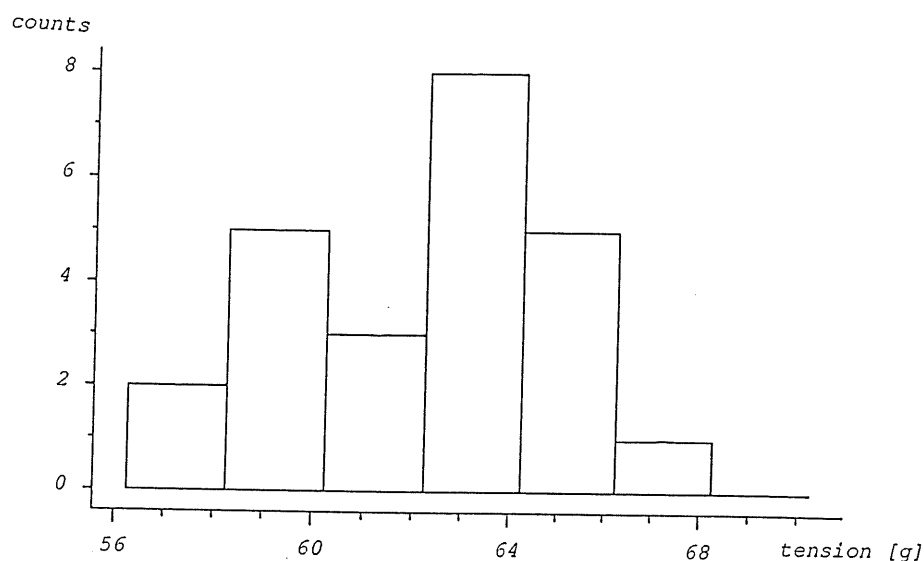


Abbildung 8.5: Drahtspannungsverteilung Signaldrähte 49-72

8.2 Testmessungen am Geometriemodell

Für Vorversuche zum Drahtspannverfahren wurde ein offenes, d.h. nicht in einen Tank einzubauendes Geometriemodell gebaut. Dieses Modell wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendet, um die Reproduzierbarkeit und die maximalen zu erwartenden Fehler anhand von Testmessungen zu überprüfen. Die Ergebnisse und Folgerungen aus diesen Messungen werden im folgenden zusammengefaßt. Die dabei verwendeten Parameter der Meßapparatur sind in Tabelle 8.2 zusammengefaßt.

Ziel der Messungen war es, Aussagen über die statistischen Fehler bei der Bestimmung der Zugspannung zu gewinnen, wie sie aus den in Kapitel 7 erwähnten Fluktuationen der Luftströmungen in der Umgebung des Drahten entstehen. Dabei befand sich der gesamte Aufbau außerhalb des oben erwähnten Staub-

	Signaldrähte	Potentialdrähte
Heizstrom [mA]	25.0	800.0
Wartezeit/Heizen [s]	0.4	2.2
Wartezeit/Einschwingen [s]	0.1	0.2
Korrekturfaktor	1.00	1.12

Tabelle 8.2: Messungen am Geometriemodell — Apparaturparameter

zettes in einer der Vorbereitungshallen bei DESY. Dieser Aufbau beinhaltet insofern besonders ungünstige Bedingungen, daß sowohl die Bewegungen der Luft als auch die Änderung der Raumtemperatur in keiner Weise kontrolliert sind. Die so gefundenen Werte stellen daher näherungsweise obere Schranken für die erreichbare Präzision dar. Eine untere Schranke ist durch die in Kapitel 7 vorgenommene Abschätzung gegeben.

Im Verlauf der Messungen wurden je ein Potential- bzw. Signaldraht mehrfach, d.h. 6000- bzw. 2000- mal gemessen. Die Verteilungen der Meßergebnisse sind in Abb. 8.6 bzw. 8.7 abgebildet. Die Asymmetrie der Verteilungen rührt aus dem in Abschnitt 6.4 erläuterten Verfahren zum Auffinden der Resonanzfrequenz her, da der Schwerpunkt einer asymmetrischen Kurve in Richtung zum breiteren Ast gegen den Extremwert verschoben ist. Das Verfahren berechnet also bevorzugt Resonanzfrequenzen, die zu niedrigeren Frequenzen hin verschoben sind. Die Ergebnisse der Messungen sind in Tabelle 8.2 zusammen-

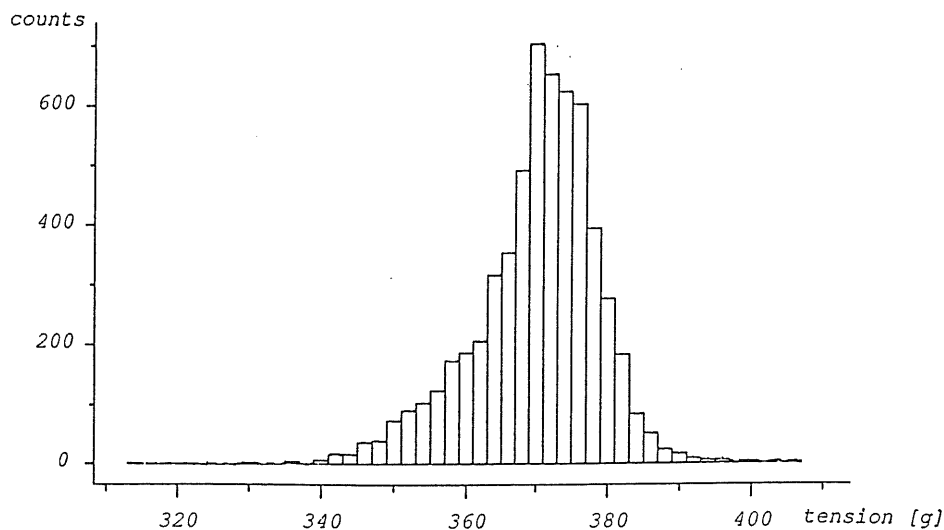


Abbildung 8.6: Verteilung der Meßwerte bei einem Potentialdraht

gefasst. Als wesentliches Ergebnis konnte durch die Messungen die wesentlich höhere Störempfindlichkeit der Potentialdrähte gezeigt werden, die bereits in Abschnitt 8.1 qualitativ erläutert wurde.

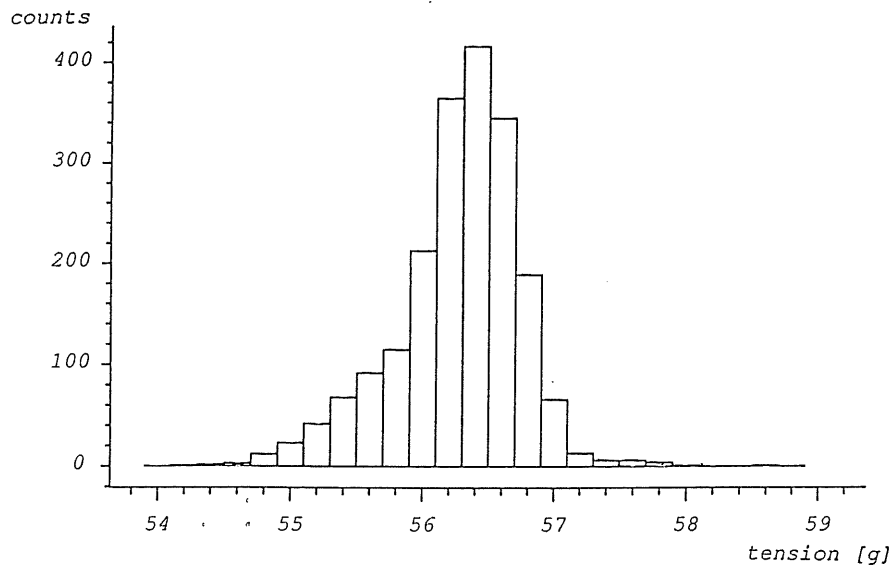


Abbildung 8.7: Verteilung der Meßwerte bei einem Signaldraht

	Signaldraht	Potentialdraht
Sollspannung [g]	60.0	400.0
Istspannung [g]	56.37 + 0.31 - 0.41	371.4 + 5.8 - 7.6
Sollfrequenz [Hz]	69.72	43.22
Istfrequenz [Hz]	65.45 + 0.18 - 0.24	38.56 + 0.30 - 0.40
Fehler der Spannungsmessung [%]	0.74	1.81
Fehler der Frequenzmessung [%]	0.32	0.91

Tabelle 8.3: Messungen am Geometriemodell — Ergebnisse

Kapitel 9

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschreibt den Aufbau und die Funktionsweise einer computergesteuerten Apparatur zur Messung von mechanischen Drahtspannungen in den zentralen Jetkammern des H1-Detektors über die Bestimmung der Resonanzfrequenz des schwingenden Drahtes.

Es wird ein auf dem CAMAC-Bus basierendes System vorgestellt das es erlaubt, bis zu acht Drähte gleichzeitig anzuschließen und zu messen wobei Auswertung, Messung und Protokollierung der Ergebnisse automatisch ablaufen. Die Apparatur wurde hinsichtlich Hardware und Software so modular konzipiert, daß eine möglichst einfache Bedienung sowie eine hohe Flexibilität in der Anwendung gegeben sind.

Die maximal erreichbare Meßgenauigkeit liegt unter 0.5 %, bezogen auf die Drahtspannung, bzw. unter 0.3 % bezogen auf die Resonanzfrequenz. Die unter realen Bedingungen erreichbare Genauigkeit hängt stark von der Drahtsorte, bzw. dem Drahtdurchmesser ab. Unter ungünstigen äußeren Umständen bei 127 μm Drähten lassen sich noch ca. 2 % erreichen. Die Dauer der Messung für einen einzelnen Draht liegt unter 30 s, bei Signaldrähten unter 20 s.

Anhang A

Differentialgleichung der schwingenden Saite

Die meisten Verfahren zur Messung von Drahtspannungen beruhen darauf, daß ein gespannter Draht als schwingendes System eine Resonanzfrequenz besitzt, die von der Zugspannung des Drahtes abhängt. Man betrachte also eine Draht der Länge L mit der Masse pro Längeneinheit μ . Eine schematisierte Darstellung eines solchen Drahtes stellt Abb.A.1 dar.

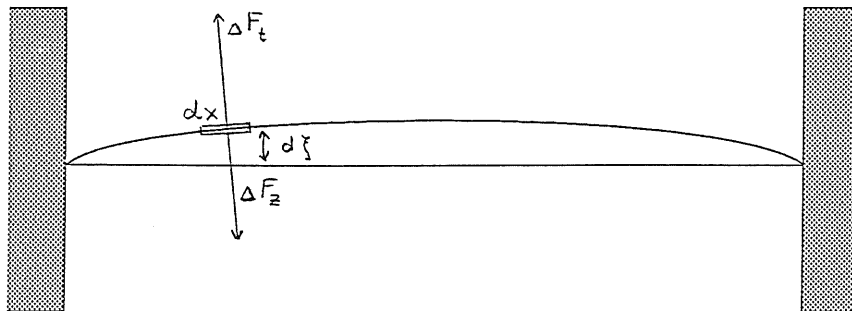


Abbildung A.1: Schematisches Bild des schwingenden Drahtes

Auf ein Drahtstück der Länge dx und der Masse pro Längeneinheit μ wirken für kleine Auslenkungen $\delta\xi$ zwei Kräfte :

- die Trägheitskraft $\Delta F_t = -\mu dx \frac{\delta^2 \xi}{dt^2}$
- die Komponente der Zugspannung $\Delta F_z = F_0 \sin(\alpha) \approx F_0 \frac{\delta \xi}{\delta x}$.

F_0 bezeichnet dabei die auf den Draht wirkende Zugspannung.

Die an den Enden des Drahtstückes wirkenden Komponenten heben sich weitgehend auf :

$$\Delta F_z = F_z(x + dx) - F_z(x) = \frac{\delta F_z}{\delta x} = F_0 \frac{\delta^2 \xi}{\delta x^2}$$

Aus der Forderung des Kräftegleichgewichts $\Delta F_z = \Delta F_t$ ergibt sich damit die Differentialgleichung

$$\frac{\delta^2 \xi}{\delta t^2} = \frac{F_0}{\mu} \frac{\delta^2 \xi}{\delta x^2} \quad (\text{A.1})$$

welche sich durch den allgemeinen Ansatz

$$\xi = T(t)X(x) \quad (\text{A.2})$$

separieren läßt und übergeht in

$$\frac{\ddot{T}(t)}{T(t)} = c^2 \frac{X''(x)}{X(x)}$$

mit $c^2 = \frac{F_0}{\mu}$. Sei ω^2 die Separationskonstante, so folgen daraus zwei getrennte Gleichungen für $T(t)$ resp. $X(x)$:

$$\ddot{T} + \omega^2 T = 0 \quad (\text{A.3})$$

sowie

$$X'' + \frac{\omega^2}{c^2} X = 0 \quad (\text{A.4})$$

Die allgemeinen Lösungen von Gl.A.3 bzw. Gl.A.4 ergeben sich dann zu

$$T(t) = A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t)$$

für Gl.A.3 und

$$X(x) = C \cos\left(\frac{\omega}{c} x\right) + D \sin\left(\frac{\omega}{c} x\right)$$

für Gl.A.4. Als allgemeine Lösung von A.1 ergibt sich gemäß A.2 also

$$\begin{aligned} \xi(x, t) &= [A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t)] [C \cos\left(\frac{\omega}{c} x\right) + D \sin\left(\frac{\omega}{c} x\right)] \\ &= AC \cos(\omega t) \cos\left(\frac{\omega}{c} x\right) \\ &\quad + AD \cos(\omega t) \sin\left(\frac{\omega}{c} x\right) \\ &\quad + BC \sin(\omega t) \cos\left(\frac{\omega}{c} x\right) \\ &\quad + BD \sin(\omega t) \sin\left(\frac{\omega}{c} x\right) \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$

Durch geeignete Wahl der Randbedingungen können die Koeffizienten A bis D und die Separationskonstante ω bestimmt werden, aus der sich die Eigenfrequenz der gesuchten Schwingung ergibt :

$$\begin{aligned} \xi(0, 0) = 0 &\quad \Rightarrow AC = 0 \\ \xi(L, 0) = 0 &\quad \Rightarrow AD \cos(\omega L) \sin\left(\frac{\omega}{c} L\right) = 0 \\ &\quad \Rightarrow \sin\left(\frac{\omega}{c} L\right) = 0 \\ &\quad \Rightarrow \omega = \frac{n\pi}{L} \sqrt{\frac{F_0}{A\rho}} \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

Dabei bedeutet n die Ordnung der Eigenschwingung. Aus der Kreisfrequenz der Eigenschwingung erhält man die Resonanzfrequenz erster Ordnung durch

$$f_0 = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{F_0}{A\rho}}. \quad (\text{A.7})$$

Die Resonanzfrequenz eines schwingenden Drahtes ist also in erster Näherung lediglich von der Drahtspannung und den mechanischen Parametern (der Länge L , dem Querschnitt A und der Dichte ρ) abhängig.

Anhang B

Schaltbilder

Dieser Anhang enthält die vollständigen Schaltbilder für die CAMAC-Karten
WTB II/a und WTB II/b.

Wire Tension Box II/a-type

measurement units
one for every wire diameter
with different current sources

WTB II/a
page 1

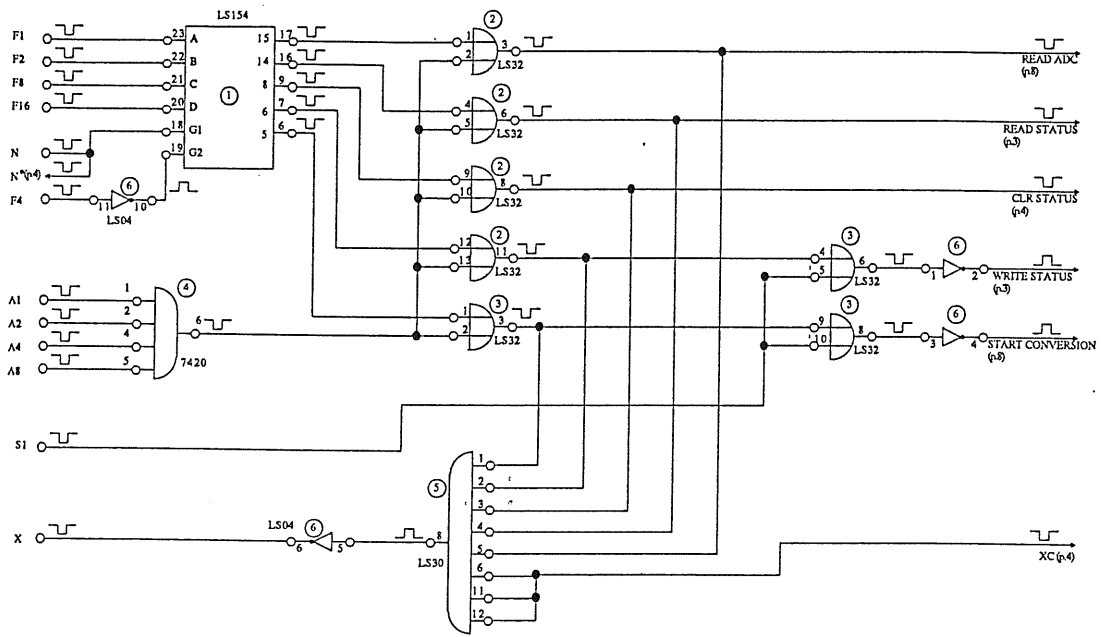
CAMAC - commands

$N \times F(0) \times A(0)$	Read ADC
$N \times F(1) \times A(0)$	Read Status, bit 0-5
$N \times F(11) \times A(0)$	Clear Status
$N \times F(17) \times A(0)$	Write Status, bit 0
$N \times F(18) \times A(0)$	Start conversion .
$N \times C$	Clear all registers

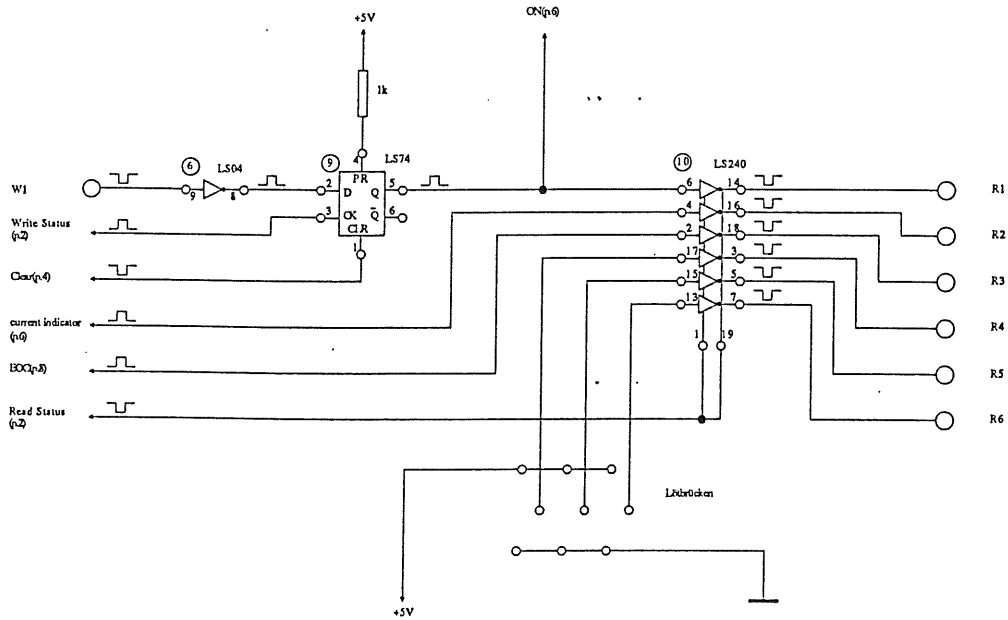
STATUS - register

0	current on/off
1	current indicator
2	end of conversion
3	} module type indicator
4	
5	

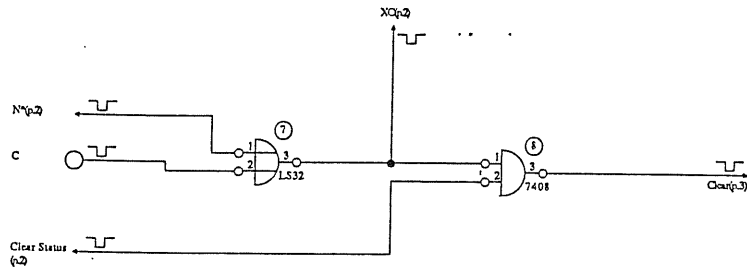
WTB II/a
page 2 - Camac Functions



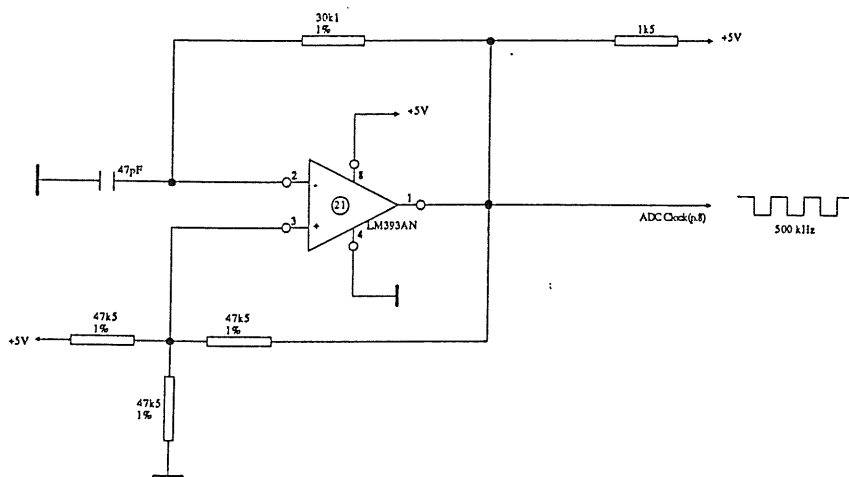
WTB II/a
page 3 - Status Register



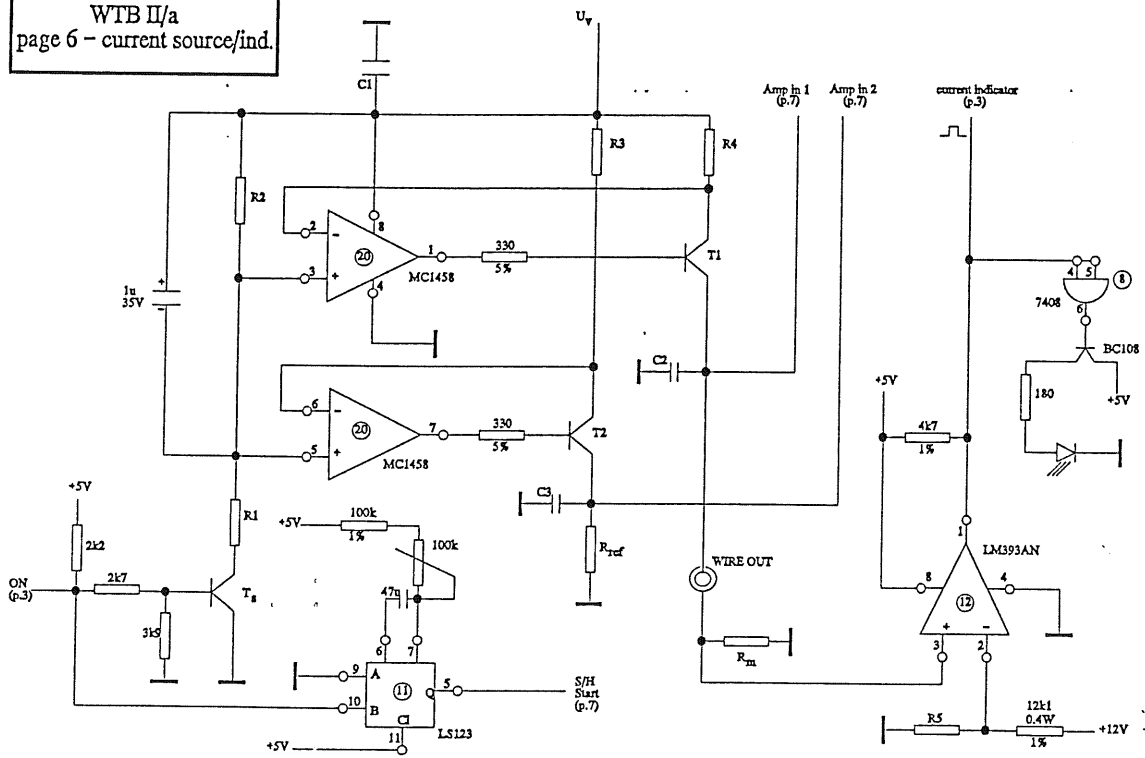
WTB II/a
page 4 - Clear function



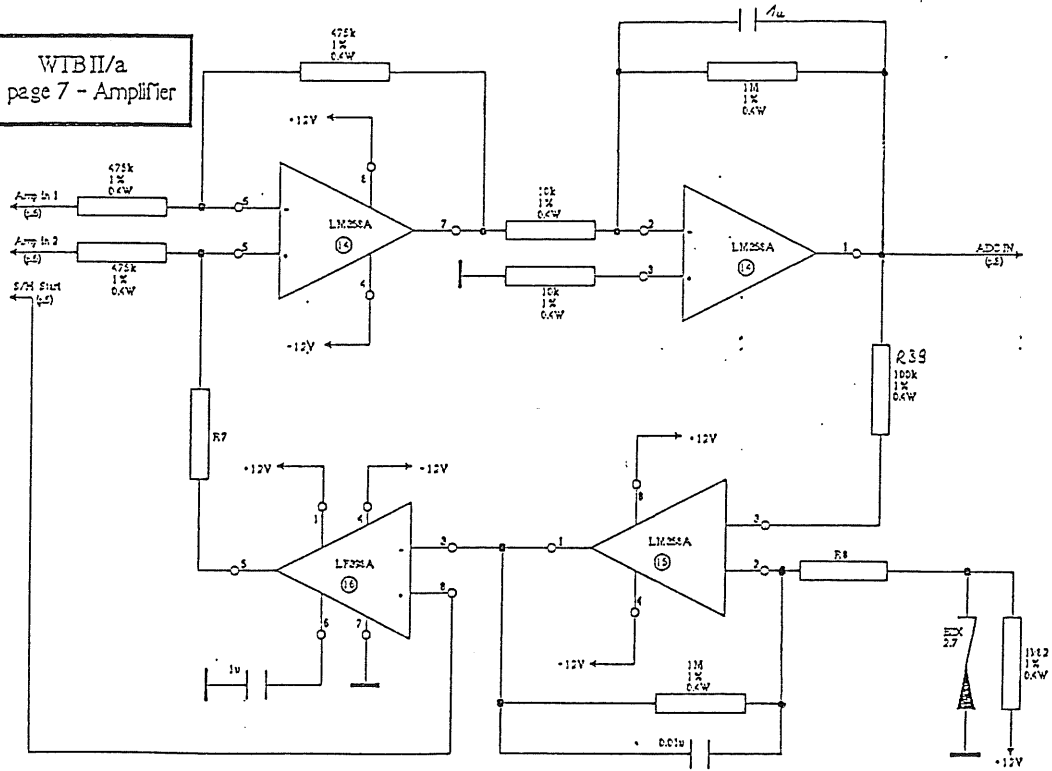
WTB II/a
page 5 - Clock Generator
500kHz



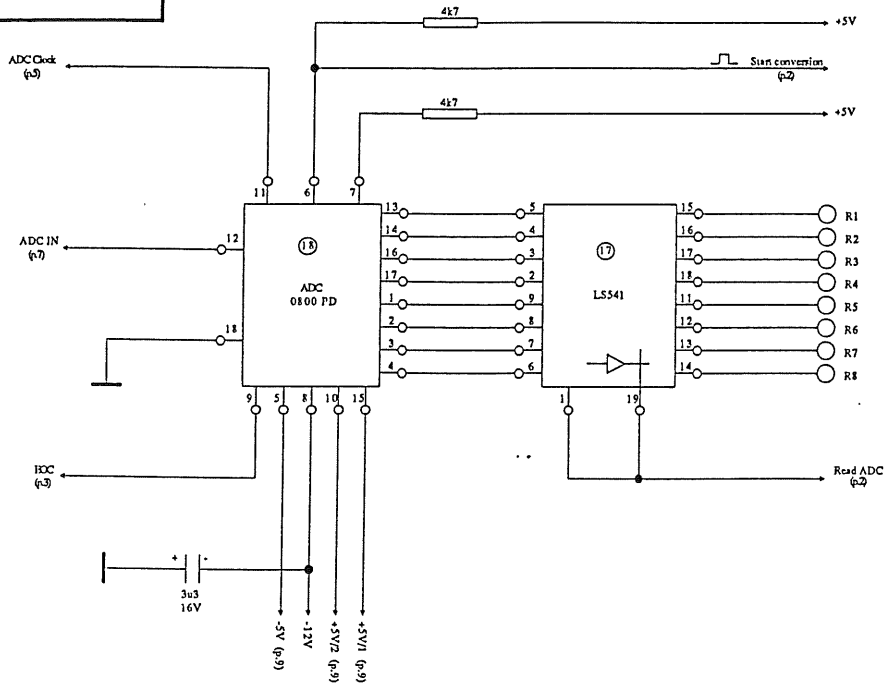
WTB II/a
page 6 - current source/ind.



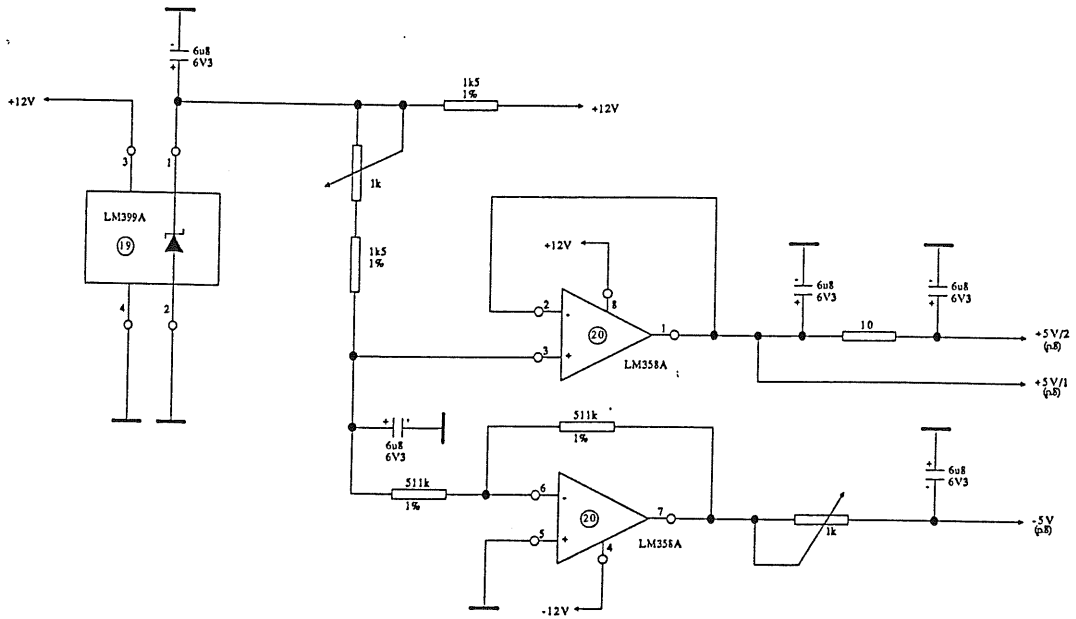
WTB II/a
page 7 - Amplifier



WTB II/a
page 8 - ADC



WTB II/a
page 9 - ADC power



Wire Tension Box II/b-type

control unit to control all a-type boxes
and the multi-relais-switch

WTRB II/b
page 1

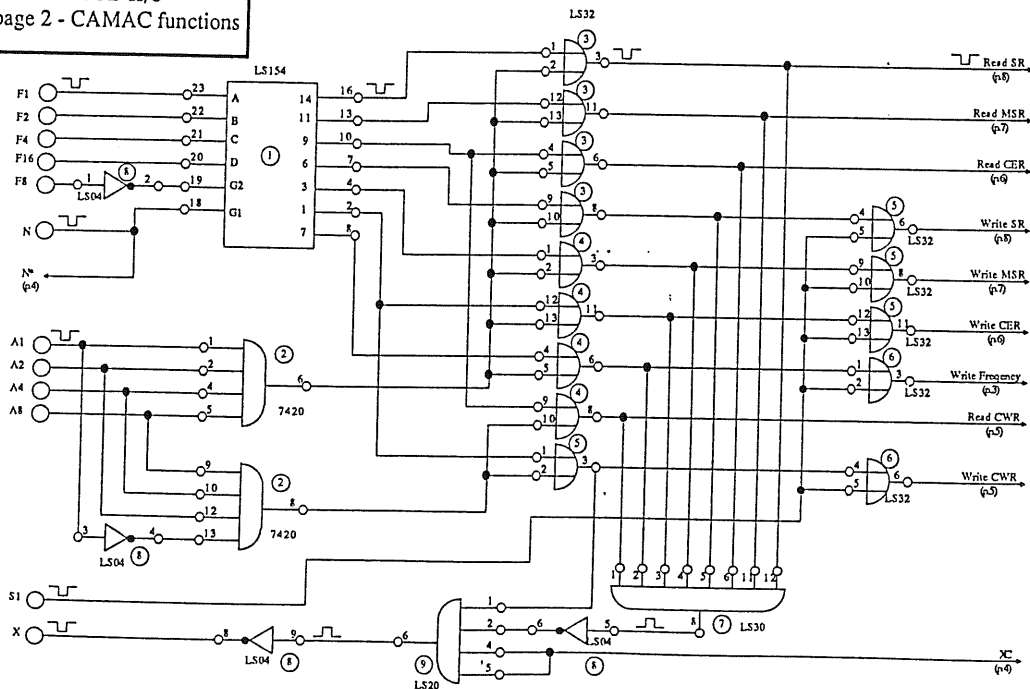
CAMAC-commands

N x F(4) x A(0)	Read MSR
N x F(6) x A(0)	Read CER
N x F(6) x A(1)	Read CWR
N x F(20) x A(0)	Write MSR
N x F(22) x A(0)	Write CER
N x F(22) x A(1)	Write CWR
N x F(16) x A(0)	Write Frequency
N x F(17) x A(0)	Write Status
N x F(1) x A(0)	Read Status
N x C	Clear all registers

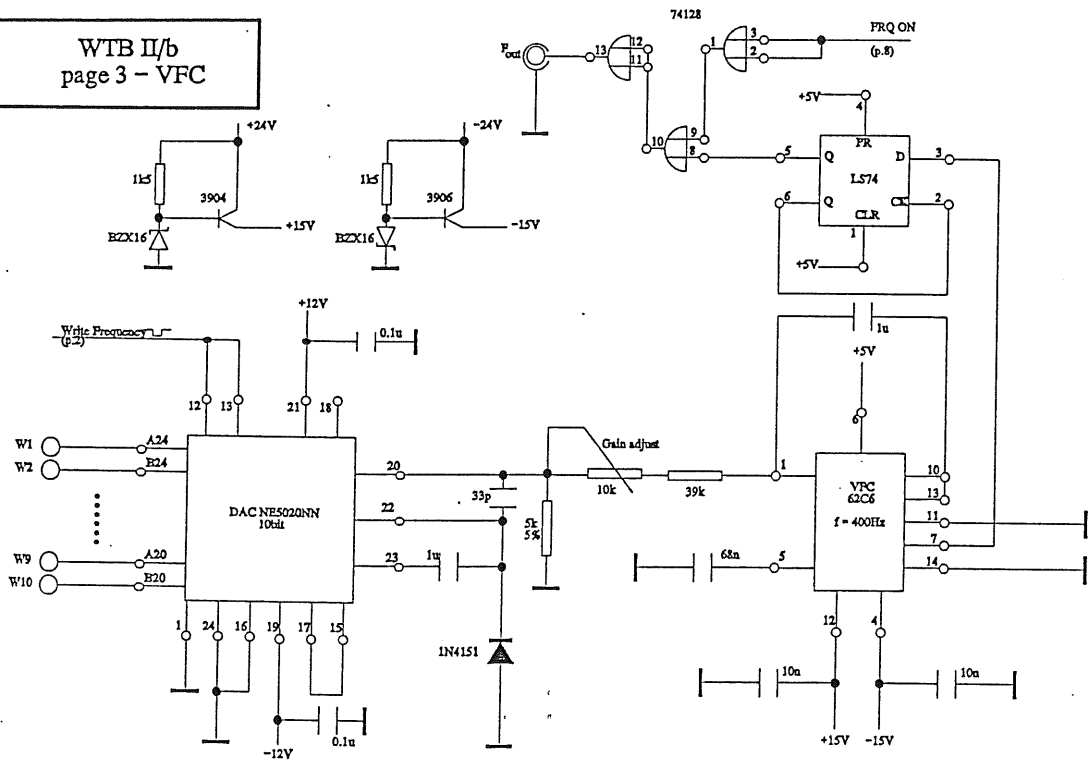
Register description

MSR	Main Switch Register	- 8 bit wide
		- HV/LV switch
CER	Current Entry Register	- 4 bit wide
		- max. 1 bit set
		- select current
CWR	Current Wire Register	- 8 bit wide
		- max. 1 bit set
		- select wire
SR	Status Register	- 1 bit freq on/off

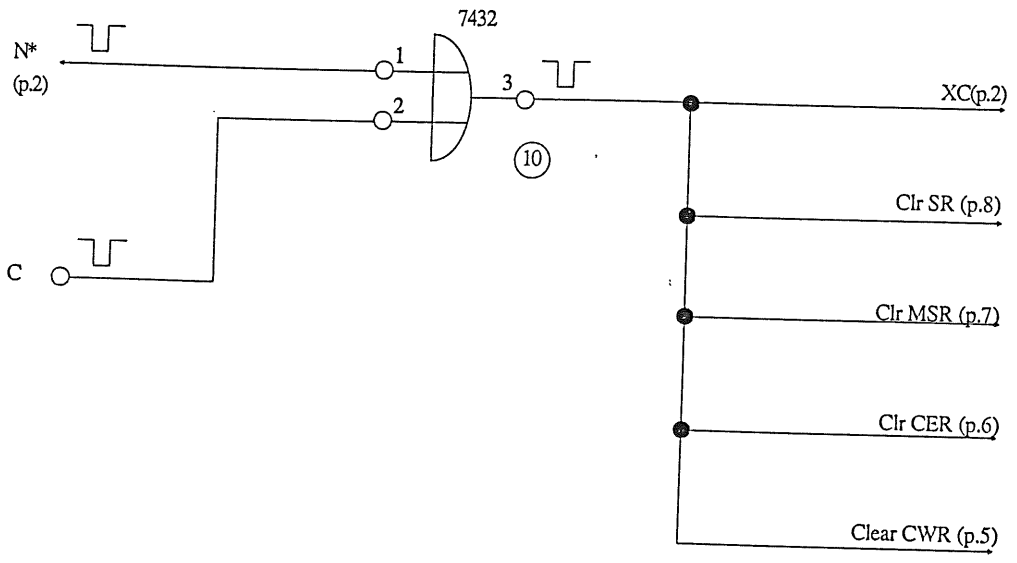
WTRB II/b
page 2 - CAMAC functions



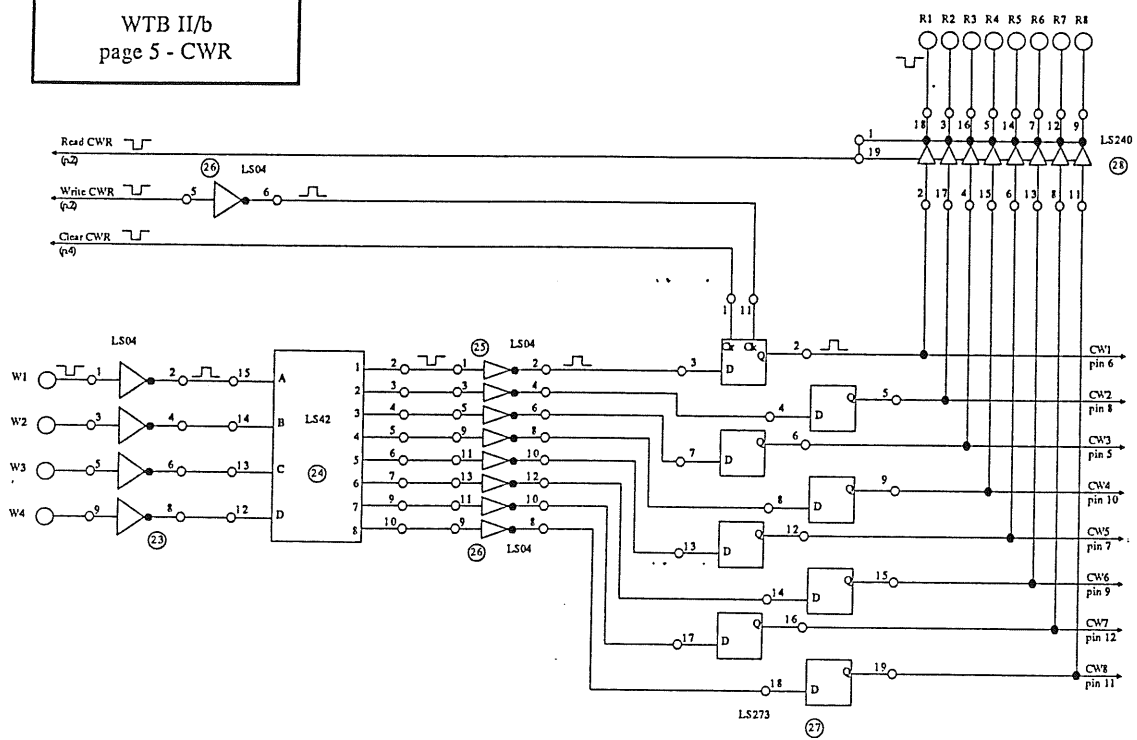
WTB II/b
page 3 - VFC



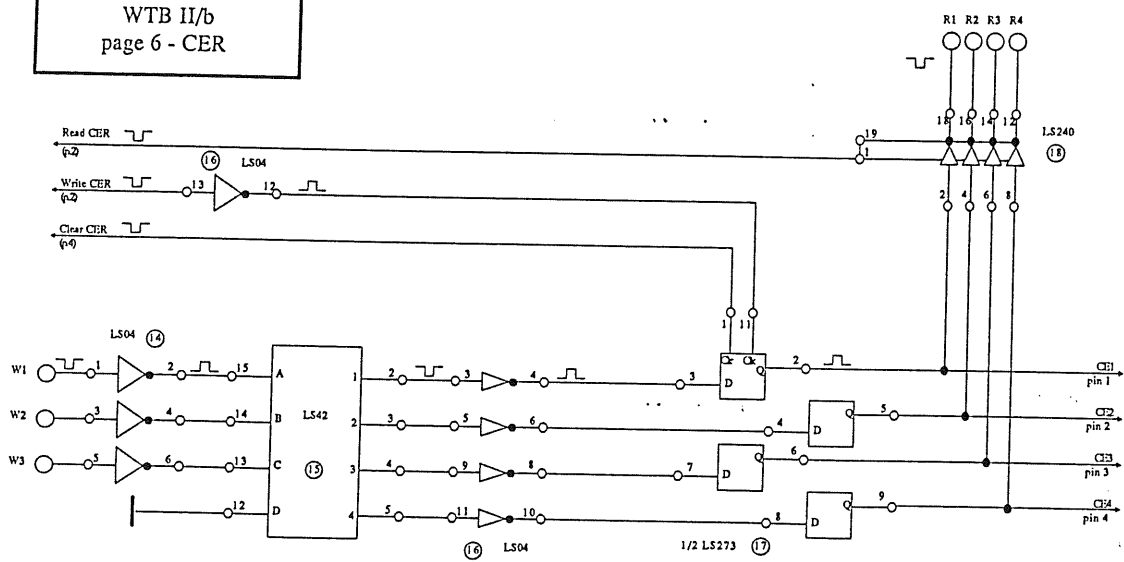
WTB II/b
page 4 - Clear function



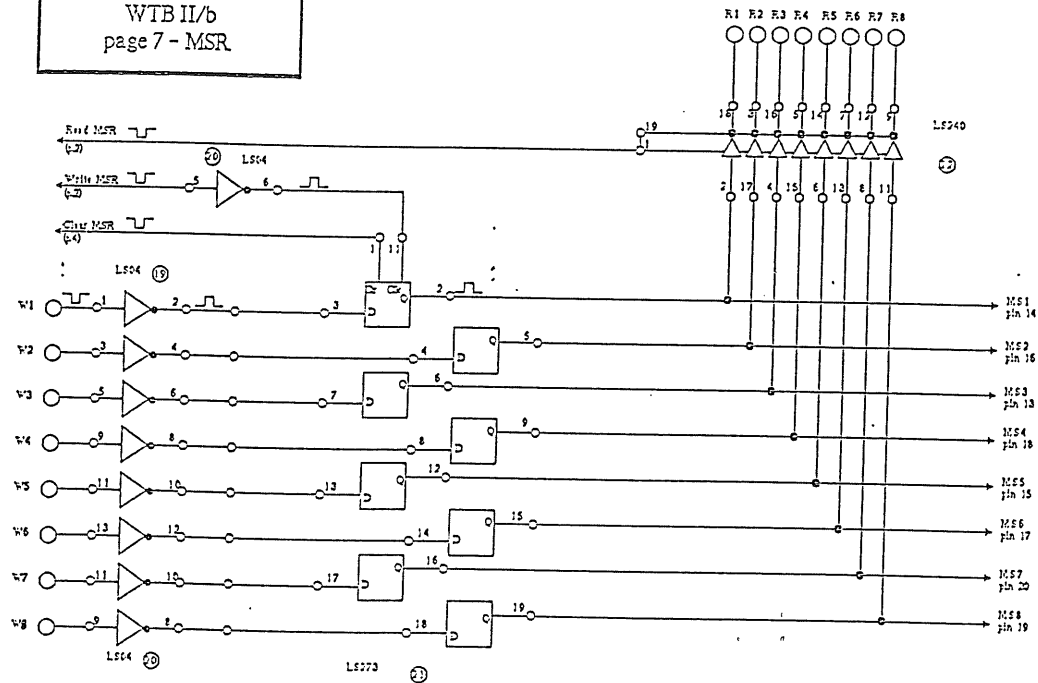
WTB II/b
page 5 - CWR



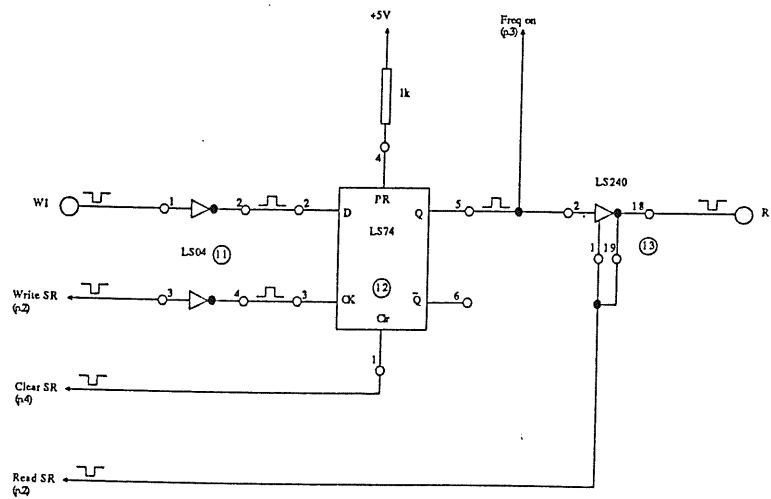
WTB II/b
page 6 - CER



WTB II/b
page 7 - MSR



WTB II/b
page 8 - Status register



Abbildungen

1.1	Injektionsschema des HERA-Speicherrings	5
1.2	Diagramme niedrigster Ordnung für NC/CC - Ereignisse sowie Photon-Gluon Fusion	7
1.3	Schnitt durch den H1-Detektor	9
2.1	Driftfeld in der CJC1 unter Einfluß eines Magnetfeldes	12
2.2	Zellstruktur der H1-Jetkammern	13
2.3	Drahtbefestigungen der CJC	15
3.1	Drahtspannverfahren	17
4.1	RHW-Meßprinzip	23
5.1	Blockschaltbild der Meßeinheit WTB II/a	29
5.2	Photographie der Meßeinheit WTB II/a	31
5.3	Blockschaltbild der Kontrolleinheit WTB II/b	32
5.4	Photographie der Steuereinheit WTB II/b	34
5.5	Blockschaltbild der Relaisbox	35
5.6	Photographie der Relaisbox WTB II/c	35
5.7	Blockschaltbild des WTB II - Systems	36
6.1	Beispiel eines Meßprogramms	40
6.2	Darstellung einer mittleren Meßreihe	41
6.3	Flußdiagramm einer Einzelmessung	43
8.1	Endplatte des Full-Size-Prototyp	48
8.2	Skizze der erwarteten Verteilung der wahren Drahtspannungen	50
8.3	Drahtspannungsverteilung Potentialdrähte	50
8.4	Drahtspannungsverteilung Signaldrähte 1-48	51
8.5	Drahtspannungsverteilung Signaldrähte 49-72	51
8.6	Verteilung der Meßwerte bei einem Potentialdraht	52
8.7	Verteilung der Meßwerte bei einem Signaldraht	53
A.1	Schematisches Bild des schwingenden Drahtes	i

Tabellen

1.1	Zusammenfassung der wichtigsten HERA-Parameter	6
2.1	geplante Leistungsdaten der CJC	14
3.1	Drahtparameter und -materialien CJC	18
4.1	Materialkonstanten der Drahttypen	25
4.2	Temperaturabhängigkeit von F und ν_{res}	25
4.3	Temperaturänderungen der Drahtsorten beim RHW-Verfahren	26
5.1	CAMAC-Kommandos der Meßeinheit WTB II/a	30
5.2	Status-Register der Meßeinheit WTB II/a	30
5.3	Register der Kontrolleinheit WTB II/b	31
5.4	CAMAC-Befehle für die Kontrolleinheit WTB II/b	33
6.1	WTB 5.0 Kommandoübersicht (Auszug)	38
8.1	Messungen am FSP — Apparaturparameter	49
8.2	Messungen am Geometriemodell — Apparaturparameter	52
8.3	Messungen am Geometriemodell — Ergebnisse	53

Literaturverzeichnis

- [ALL80] W.W. M. Allison and J. H. Cobb, *Relativistic Charged Particle Identification by Energy Loss* /ANN. REV. NUCL. PART. SCI., VOL. 30 (1980)
- [BÜR86] J.Bürger et al., *A Method to measure the Mechanical Tension of Wires in a Big Cylindrical Driftchamber* /UNVERÖFFENTLICHT
- [BÜR89] J.Bürger et al., *The Central Jet Chamber of the H1-Detector at HERA* /NUCLEAR INSTRUMENTS AND METHODS 279 (1989) 217-222
- [CAL80] M.Calvetti et. al., *A Computer-aided system for MWPC wire tension control* /NUCLEAR INSTRUMENTS AND METHODS 174 (1980) 285-289
- [COL81] L.Collatz, *Differentialgleichungen* /B.G. TEUBNER VERLAG STUTTGART 1981
- [DRU80] H.Drumm et al., *Experience with the Jet-Chamber of the JADE-Detector at PETRA* /NUCLEAR INSTRUMENTS AND METHODS 176 (1980) 333-334
- [DSP86] DSP TECHNOLOGY, *technical reference manual*
model 6001/6002 CAMAC crate controller
model PC004 IBM PC interface card
model 9100 IBM PC software drivers /APRIL 1986
- [EHL89] H.Ehlers, DESY F33 *private Mitteilung* 1989
- [ELL88] R.K.Ellis, *An introduction to the QCD parton model* /FERMILAB-CONF-88/60-T , MAI 1988
- [HUL81] H.Hultschig und A.Ladage, *Measurement of wiretension in Drift tubes by resonance in a magnetic field* /DESY INTERNAL REPORT DESY 81-065
- [H1-86] H1 Collaboration, *The Technical Proposal for the H1 Detektor* /MÄRZ 1986
- [H1-87] H1 Collaboration, *Technical Progress Report H1 Collaboration* /OKTOBER 1987
- [KLE84] K.Kleinknecht, *Detektoren für Teilchenstrahlung* /B.G. TEUBNER VERLAG STUTTGART 1984

- [LIN88] H.Lindner (Hrsg), *Elektrotechnik - Elektronik, Formeln und Gesetze* /VEB FACHBUCHVERLAG LEIPZIG, 3.AUFLAGE LEIPZIG 1988
- [LOH87] E.Lohrmann, *The HERA machine - status and opportunities* /DESY INTERNAL REPORT DESY F35D-87-01 NOVEMBER 1987
- [REG84] Thomas Regan, *A sensitive instrument for measuring wire tension in multiwire proportional and drift chambers* /NUCLEAR INSTRUMENTS AND METHODS 219 (1984) 100-102
- [STU74] H.-J. Stuckenberg, *Interface-System für Prozeßrechner Band 2 - Das CAMAC-BUS-System* /DESY INTERNER BERICHT DESY F56-74/1, JUNI 1974
- [WAL87] E.Walther (Hrsg), *Technische Formeln für die Praxis* /VEB FACHBUCHVERLAG LEIPZIG, 26.AUFLAGE LEIPZIG 1987
- [WOL86] G.Wolf, *HERA: physics, machine and experiments* /DESY INTERNAL REPORT DESY 86-089 AUGUST 1986

Ich danke Herrn Prof. Dr. H. Spitzer vom II.Institut für Experimentalphysik für die Ermöglichung dieser Arbeit sowie Herrn Dr. J. Bürger von DESY für die Betreuung und Hilfestellung 'vor Ort'.

Ferner danke ich allen Mitarbeitern der Gruppe FH1T/F33 für die vielfältigen Diskussionen, Hilfen und die angenehme Arbeitsathmosphäre.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern für ihre Unterstützung und den Rückhalt, den sie mir immer wieder gaben.

Ich versichere, daß ich die Arbeit unter Angabe aller verwendeter Referenzen selbstständig angefertigt habe.

Hamburg im Oktober 1989

(Andreas Runge)