

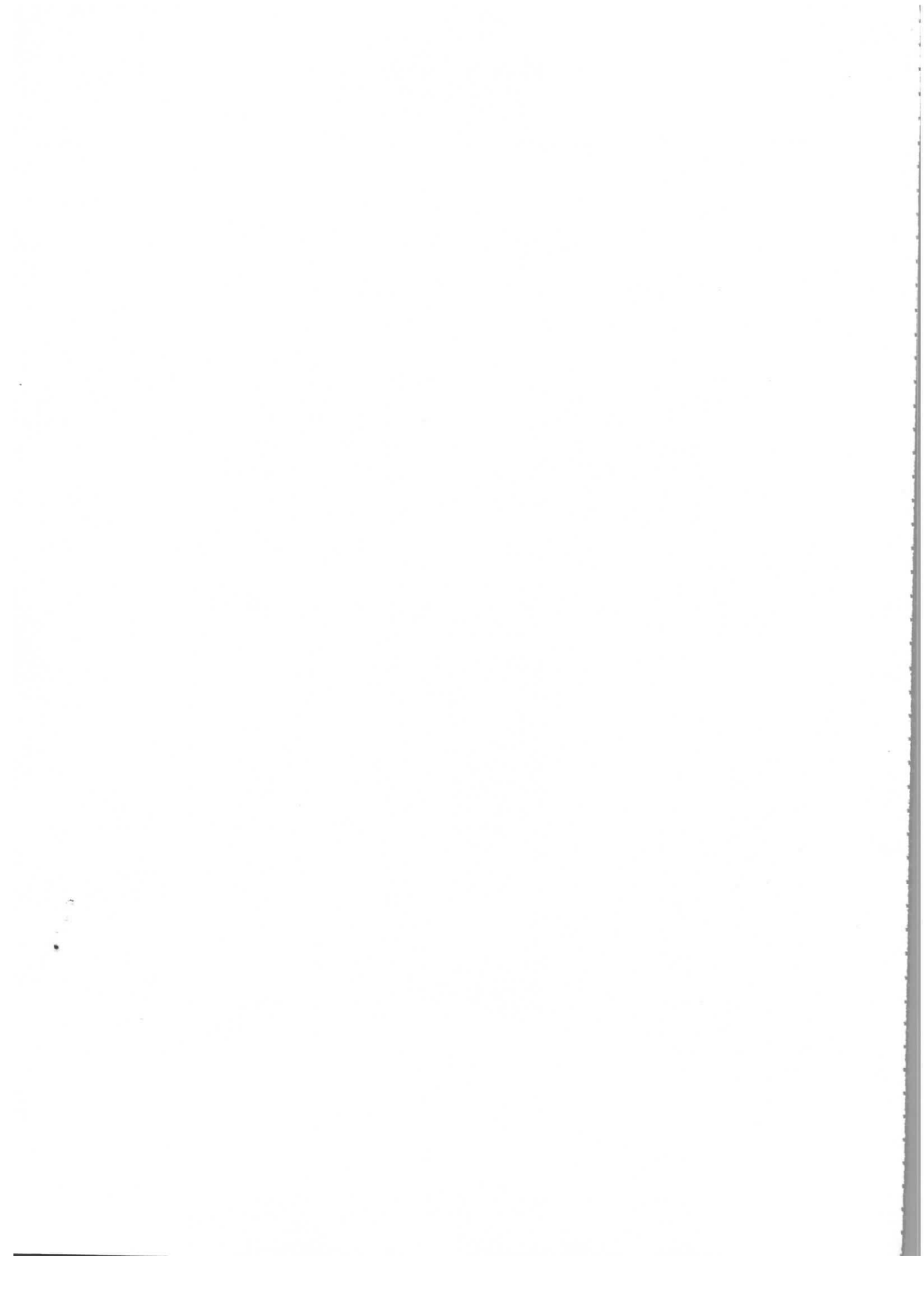
Interner Bericht
DESY F14-78/04
Juni 1978

DESY-Bibliothek
28. JULI 1978

Aufbau und Erprobung eines großflächigen Systems
von Wendelrohren für den Detektor "PLUTO"

von

Olaf Achterberg



Aufbau und Erprobung eines großflächigen
Systems von Wendelrohren für den Detektor "PLUTO"

Experimentelle-physikalische Diplomarbeit

dem Fachbereich Physik
der Universität Hamburg
vorgelegt von

Olaf Achterberg

Hamburg 1978

Inhaltsverzeichnis

Seite

1.	Einleitung	1
2.	Gründe für die Wahl des Wendelrohrprinzips	3
3.	Die Wendelrohre	5
3.1	Funktion der Wendelrohre	5
3.1.1	Aufbau und Arbeitsprinzip eines Wendelrohres	5
3.1.2	Das Wendelrohr als elektromagnetische Verzögerungsleitung	9
3.1.2.1	Der Kapazitätsbelag	11
3.1.2.2	Der Induktionsbelag	12
3.1.2.3	Wellenwiderstand und Laufzeit	15
3.1.2.4	Berechnung der Wendelrohrparameter und Vergleich mit Messungen	16
3.2	Die Herstellung der Wendelrohre	20
3.2.1	Wickeln der Wendel und Aufbringen des Dielektrikums	20
3.2.2	Feinarbeiten und Test	21
3.2.3	Ergebnis der Fertigung	24
3.3	Die Ausleseelektronik	25
3.3.1	Die Vorverstärker	25
3.3.2	Der Hauptverstärker und das Prinzip der Digitalisierung	26
3.4	Untersuchung von Wendelrohren mit einer radioaktiven Quelle	31
3.4.1	Der Testaufbau	31
3.4.2	Die Impulsformen	35
3.4.3	Die Nachweiswahrscheinlichkeit	39
3.4.4	Die Ortsauflösung	41
3.4.5	Die Linearität	43
3.4.6	Die Abhängigkeit der gemessenen Laufzeitdifferenz von der Anodenspannung	45

		Seite
4.	Die Anwendung von Wendelrohren im Detektor PLUTO	48
4.1	Der Detektor PLUTO	48
4.2	Die Geometrie der Wendelrohrkammer im Detektor PLUTO	51
4.3	Die Auslese der Wendelrohrkammer	56
4.3.1	Auswirkungen durch Störimpulse	56
4.3.2	Auswirkungen durch Mehrfachtreffer	57
4.4	Die Eichung der Wendelrohrkammer mit Hilfe des PLUTO-Innendetektors	59
4.4.1	Das Programm HELIX	62
4.4.2	Ergebnisse der Eichung	67
4.5	Die Eigenschaften der Wendelrohrkammer	70
4.5.1	Die Z-Auflösung	70
4.5.1.1	Das Programm AUFLÖSES	70
4.5.1.2	Ergebnis der Messungen	74
4.5.2	Die Ermittlung des günstigsten Arbeitspunktes	75
4.5.2.1	Das "PLUTO-Gas"	75
4.5.2.2	Bestimmung des Geigerbereichs	77
4.5.2.3	Die Nachweiswahrscheinlichkeit	79
4.5.2.4	Die Abhängigkeit der gemessenen Laufzeitdifferenz von der Anodenspannung	79
4.5.2.5	Ergebnis der Messungen	82
5.	Zusammenfassung	83

Literaturverzeichnis

Seite

84

Liste der Abbildungen

86

Liste der Tabellen

88

Danksagung

89

1. Einleitung

In der vorliegenden Arbeit werden der Aufbau und die Erprobung einer neuartigen Proportional-kammer, der Wendelrohrkammer, für den Detektor PLUTO beschrieben.

PLUTO ist ein magnetisches Spektrometer, das mit einem zylindrischen System von Proportional-kammern die geladenen Reaktionsprodukte der Elektron-Positron-Vernichtung nachweist. 1977 wurde ein tonnenförmiger Schauerzähler in Blei-Szintillator-Bauweise zur verbesserten Photonen- und Elektronenerkennung in den Detektor eingebaut.

Der Schauerzähler selbst liefert nur eine sehr grobe Aussage über den Ort des Schauers. Besonders für den Nachweis von Photonen, aber auch allgemein für die Zuordnung zwischen Spuren und Schauern, ist jedoch eine gute Ortsbestimmung des Schauers unerlässlich. Es bestand daher die Aufgabe, einen zylindrischen Ortsdetektor zu entwickeln, der beide Ortskoordinaten geladener Teilchen in der Zylinderfläche mißt. Proportional-kammern mit einer Bauweise wie sie im PLUTO-Innen-detektor benutzt wird, konnten hierfür nicht verwendet werden, weil sie keinen Platz für die Stützkonstruktion der schweren Blei-Szintillator-Zähler lassen. Außerdem wurde ein Detektor angestrebt, bei dem die bei Proportional-kammern unvermeidlichen Mehrdeutigkeiten in der Zuordnung von Raumkoordination vermieden werden.

Der Ortsdetektor für den Schauerzähler sollte folgende Eigenschaften besitzen:

1. Möglichkeit, den Durchgangsort geladener Teilchen eindeutig zu bestimmen;
2. Geringe Bauhöhe, da die geometrischen Abmessungen des Schauerzählers durch die Detektorspule begrenzt sind;
3. Zuverlässigkeit und Robustheit.

Diese Forderungen werden weitgehend mit einem zylindrischen System von 880 Wendelrohren erfüllt. Wendelrohre sind spezielle Proportionalrohre, bei denen mit Hilfe einer wendelförmigen Verzögerungsleitung die Ortskoordinate entlang der Zähldrähte eindeutig bestimmt werden kann.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich im wesentlichen in zwei Teile. Der erste Teil behandelt die Wendelrohre im allgemeinen. Nach der Beschreibung der Funktionsweise der Wendelrohre werden Näherungsformeln zur Berechnung der elektrischen Parameter der Wendel-Verzögerungsleitung angegeben. Es folgt die Beschreibung eines am DESY entwickelten Herstellungsverfahrens für die Wendelrohre und die Erläuterung der verwendeten Ausleseelektronik. Schließlich werden die mit Hilfe einer radioaktiven Quelle gemessenen Eigenschaften der Rohre wie Nachweiswahrscheinlichkeit, Ortsauflösung und Linearität angegeben.

Der zweite Teil der Arbeit beschäftigt sich mit der Anwendung der Wendelrohre im Schauerzähler des Detektors PLUTO. Die Eichung der einzelnen Rohre wird beschrieben, und die Eigenschaften, die sich durch Messung mit kosmischer Strahlung ergeben haben, werden angegeben und diskutiert.

2. Gründe für die Wahl des Wendelrohrprinzips

Im allgemeinen werden bei Proportionalkammern nur die Anodendrahtsignale ausgelesen. Durch die Auslese vieler paralleler Zähldrähte in einer Kammer kann eine Ortskoordinate eines durch die Kammer geflogenen geladenen Teilchens bestimmt werden. Im einfachsten Fall erhält man die zweite Ortskoordinate durch eine zweite Proportionalkammer, deren Signaldrähte gekreuzt zu denen der ersten angeordnet sind. Dieses Verfahren läßt sich aber nur bei Verwendung ebener Kammern durchführen. Insbesondere bei Solenoiddetektoren (z.B. PLUTO) mit zylindrischer Kammergeometrie muß das Problem der zweidimensionalen Auslese anders gelöst werden. Um auch hier die zweite Ortskoordinate (z-Koordinate parallel zur Zylinderachse) zu bestimmen, kann man die auf der Kathode influenzier-ten Signale verwenden.

Dazu gibt es zwei Verfahren:

1. Die Streifenauslese

Die Kathode wird in mehrere Streifen aufgeteilt. Die Streifen werden einzeln ausgelesen und aus den angesprochenen Streifen kann die zweite Ortskoordinate bestimmt werden (DER 75).

2. Auslese mit Verzögerungsleitung

Die Kathode wird als elektromagnetische Verzögerungsleitung ausgebildet. Aus der Laufzeitdifferenz zwischen dem schnellen Zähl- drahtimpuls und dem über die Verzögerungsleitung gelaufenen Katho- densignal wird die zweite Ortskoordinate bestimmt (GRO 72, LEE 72).

Bisher wurden im Innendetektor von PLUTO nur zylindrische Proportionalkammern mit Streifenauslese verwendet. Mit diesen Kammern ist bei Ereignissen mit mehreren Spuren eine eindeutige Ortsbestimmung der geladenen Teilchen nur möglich, wenn ein System von mehreren Kammern zur Verfügung steht. Im Schauerzähler muß die Ortsmessung jedoch auf engstem Raum durchgeführt werden. Deshalb wurden in der PLUTO-Gruppe Proportionalrohre entwickelt, die eine eindeutige Messung des Durchgangsortes geladener Teilchen ermöglichen.

Sie arbeiten nach dem zweiten Ausleseverfahren und haben den Namen Wendelrohre erhalten, da die Kathode als Drahtwendel ausgebildet ist. Auf die Funktionsweise der Wendelrohre wird in Kap. 3.1 ausführlich eingegangen.

Durch Zusammenfassung vieler Wendelrohre zu einer Wendelrohr- kammer erhält man eine Proportionalkammer mit zweidimensionaler Ortsauslese.

Gegenüber den bisher benutzten Proportionalkammern mit Streifen- auslese haben Wendelrohrkammern folgende Vorteile (ZIM 76):

1. Eindeutige Bestimmung der Ortskoordinate (z) entlang den Zähldrähten.
2. Faktor 6 höhere Influenzsignale auf der Wendel gegenüber den Streifen, dadurch größerer Störabstand.
3. Infolge der Kreissymmetrie der Rohre geringere Feldstärke und somit geringere Durchschlagsneigung und höhere Betriebssicherheit.
4. Wegen der Feldsymmetrie kann mit kleineren mechanischen Draht- spannungen (0,49 N (= 50 p) statt 0,98N (= 100 p)) gearbeitet werden, dadurch höhere Zuverlässigkeit.
5. Bei Drahtbruch wesentlich kleinere Raumwinkeleinschränkung, da alle Rohre elektrisch entkoppelt sind.
6. Vernachlässigbar kleine kapazitive Kopplung zwischen den Wendel- rohren und somit praktisch kein Übersprechen ($< 2 \times 10^{-3}$).
7. Ungefähr um Faktor 10 bessere Ortsauflösung in der z-Richtung.

3. Die Wendelrohre

3.1 Funktion der Wendelrohre

3.1.1 Aufbau und Arbeitsprinzip eines Wendelrohres

Ein Wendelrohr ist ein spezielles Proportionalrohr mit einer homogenen elektromagnetischen Verzögerungsleitung als Außenmantel. Die Verzögerungsleitung besteht aus einer mit konstanter Steigung gewickelten Drahtwendel, einem Dielektrikum und einer darüberliegenden Abschirmfolie. In der Abschirmfolie entlang des Rohres ist ein Schlitz. Eine geschlossene Abschirmung um die Wendel würde eine Kurzschlußwindung darstellen, und Wirbelströme würden die Eigenschaften der Verzögerungsleitung in unerwünschter Weise beeinflussen. Eine starke Störung der Impulsformen auf der Wendel wäre die Folge.

Der Zähl draht wird an den Rohrenden so befestigt, daß er sich im Zentrum des Rohres befindet. Abb. 1 zeigt den Aufbau eines Wendelrohres.

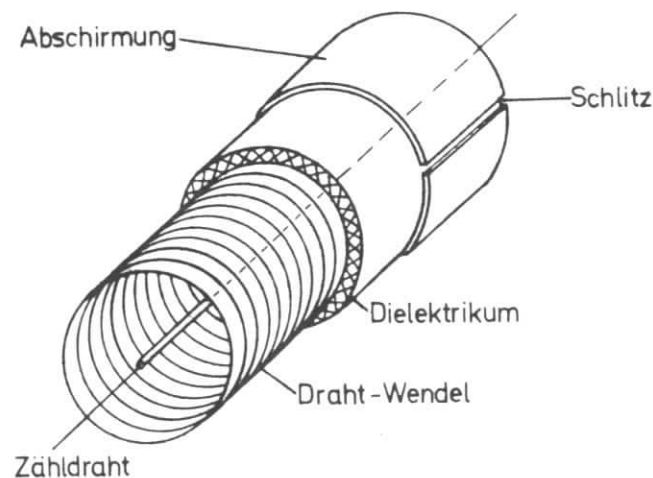


Abb. 1 Aufbau eines Wendelrohres

Zwischen Abschirmung und Zähl draht (Anode) wird eine positive Hochspannung gelegt. Die Entstehung elektrischer Signale beim Durchgang geladener Teilchen geschieht in den Wendelrohren auf dieselbe Weise wie in Proportionalkammern^{*)}. Trifft ein geladenes Teilchen das Wendelrohr, ionisiert es das Gas im Rohr, und es entstehen Elektronen-Ionen-Paare. Durch das elektrische Feld zwischen den Elektroden werden die freigewordenen Elektronen beschleunigt und bewegen sich zum Zähl draht. In unmittelbarer Nähe des Drahtes ist das elektrische Feld so stark, daß es durch Stöße der Elektronen mit anderen Gasmolekülen zu weiteren Ionisationen kommt. Die Zahl der Ladungsträger wird vervielfacht, und es entsteht eine Elektronenlawine. Diese Gasverstärkung führt zu einem meßbaren Stromimpuls auf dem Zähl draht. Auf der Wendel entsteht durch Influenz am Ort des Teilchendurchgangs ein Signal mit umgekehrtem Vorzeichen.

Durch den homogenen Aufbau des Wendelrohres ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Impulse auf der Wendel konstant. Die auf der Wendel influenzierte Ladung teilt sich in zwei Signale auf, die jeweils mit konstanter Geschwindigkeit zu den Rohrenden laufen. Die Geschwindigkeit (Komponente parallel zum Zähl draht) beträgt dabei ungefähr 1/100 der Lichtgeschwindigkeit. Die elektromagnetische Kopplung zwischen Wendel und Zähl draht ist vernachlässigbar klein.

Die Signale von Zähl draht und Wendel werden an den Enden des Rohres ausgelesen.

Die Entfernung des Teilchendurchganges von der Wendelausleseseite soll im folgenden als z-Wert bezeichnet werden. Durch Messung der Zeitdifferenz Δt zwischen dem schnellen Zähl drahtsignal und dem verzögerten Wendelsignal am Rohrende erhält man ein zum z-Wert proportionales Zeitsignal. Es gilt für die Laufzeitdifferenz

$$\Delta t = a z + t_k \quad , \quad (3.1)$$

^{*)} Einen guten Überblick über die Vorgänge in Proportionalkammern und den gegenwärtigen Stand der Forschung auf diesem Gebiet gibt SAU 77.

wobei a durch die Laufzeiten auf Wendel und Draht bestimmt wird, und t_k durch Kabellaufzeiten und die verwendete Elektronik bedingt ist. Kennt man die Eigenschaften der Verzögerungsleitung, kann man aus der gemessenen Laufzeitdifferenz Δt den Ort (z) des Teilchendurchganges entlang des Rohres berechnen.

Abb. 2 zeigt das Arbeitsprinzip eines Wendelrohres. Die Wendel ist mit dem Wellenwiderstand Z_0 der Verzögerungsleitung auf beiden Seiten abgeschlossen, um Reflexionen der Impulse an den Rohrenden zu verhindern. Da die Anode auf Hochspannung liegt, wird der Zähl-drahtimpuls über einen Kondensator ausgekoppelt. Die gemessene Laufzeitdifferenz Δt wird schließlich zur Weiterverarbeitung in ein digitales Signal umgewandelt.

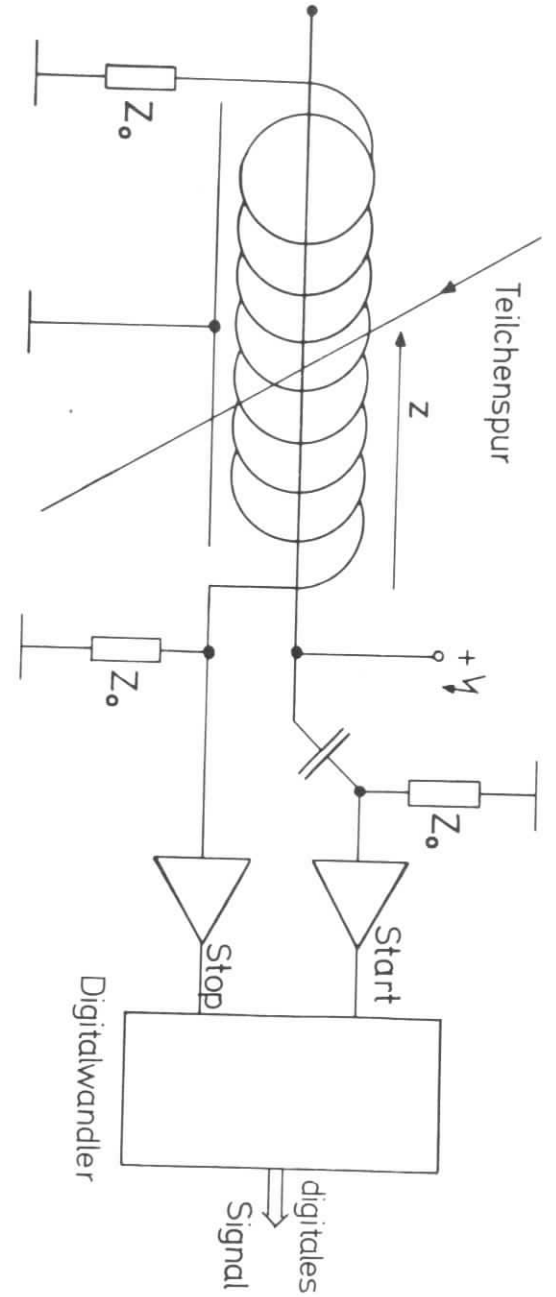


Abb. 2 Arbeitsprinzip eines Wendelrohres

3.1.2 Das Wendelrohr als elektromagnetische Verzögerungsleitung

Die Drahtwendel mit dem außen aufgebrachtene Dielektrikum und der darüberliegenden Abschirmfolie stellt eine elektromagnetische Verzögerungsleitung dar. Das elektromagnetische Feld einer Welle, die die Leitung entlangläuft, ist im wesentlichen zwischen Wendel und Dielektrikum konzentriert. Die Eigenschaften einer derartigen Verzögerungsleitung, wie Laufzeit und Wellenwiderstand, hängen vor allem vom Kapazitätsbelag C' (Kapazität pro Längeneinheit) zwischen Wendel und Abschirmung und vom Induktionsbelag L' (Induktivität pro Längeneinheit) der Wendel ab. Es stellt sich deshalb die Aufgabe, diese beiden Größen aus den geometrischen Daten des Rohres und der relativen Dielektrizitätskonstante des Dielektrikums zu berechnen. Zur Vereinfachung der Rechnung faßt man dazu die über eine Windung verteilte Kapazität zu einer Kapazität C und die wirksame Induktivität einer Windung zu einer Induktivität L zusammen. Abb. 3 zeigt das näherungsweise gültige Ersatzschaltbild. Die Kapazität zwischen den einzelnen Windungen und Verluste der Leitung sind bei dieser einfachen Ersatzschaltung vernachlässigt.

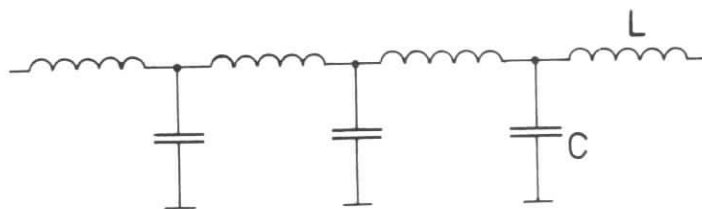


Abb. 3 Vereinfachtes Ersatzschaltbild einer elektromagnetischen Verzögerungsleitung

C ist dabei die Kapazität zwischen einer Windung der Wendel und der Abschirmung. L setzt sich aus der Selbstinduktivität L_s einer Windung und der Gegeninduktivität M gegenüber den anderen Windungen der Wendel zusammen. Die Gegeninduktivität spielt eine wichtige Rolle, da die einzelnen Windungen nicht entkoppelt sind.

In den folgenden Abschnitten werden für die elektrischen Parameter der Wendelrohr-Verzögerungsleitung Näherungsformeln entwickelt. Schließlich folgt ein Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Werten für zwei unterschiedliche Wendelrohrtypen. Der Kapazitätsbelag C' und der Induktionsbelag L' beziehen sich im folgenden immer auf die Wendeldrahtlänge und nicht auf die Wendelrohrlänge.

3.1.2.1 Der Kapazitätsbelag

Der Kapazitätsbelag C' (= Kapazität pro Wendeldrahtlänge) des Wendelrohres wird durch die Kapazität zwischen Wende und Abschirmung bestimmt. Abb. 4 zeigt einen schematischen Längsschnitt des Wendelrohres.

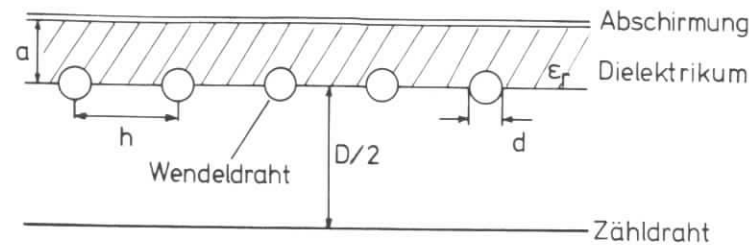


Abb. 4 Schematischer Längsschnitt des Wendelrohres

Es werden folgende Abkürzungen verwendet:

- D = mittlerer Wendeldurchmesser (cm)
- d = Durchmesser des Wendeldrahtes (cm)
- a = Abstand zwischen der Mitte des Wendeldrahtes und der Abschirmung (cm)
- h = Steigung der Wende (cm)
- ϵ_r = relative Dielektrizitätskonstante des Dielektrikums

Die komplizierte Berechnung des Kapazitätsbelages kann vereinfacht werden, da bei den verwendeten Wendelrohren die Beziehung $d \approx h/2$ gilt (siehe Tabelle 1 und 2). Die Stärke des elektrischen Feldes an der Abschirmung und der Wende liegt dann in gleicher Größenordnung. Da außerdem $D \gg a$, kann als Näherung das Modell eines Plattenkondensators zwischen Wende und Abschirmung verwendet werden. Für die Kapazität C zwischen einer Windung der Wende und der Abschirmung gilt dann angenähert

$$C \approx \epsilon_0 \epsilon_r \pi \frac{Dh}{a} \quad (F) \quad (3.2)$$

mit $\epsilon_0 = 0,0886 \cdot 10^{-12} \text{ F/cm}$.

Dividiert man durch den Umfang $\pi \cdot D$ einer Windung, ergibt sich schließlich der Kapazitätsbelag C' (= Kapazität pro Wendeldrahtlänge)

$$C' \approx \epsilon_0 \epsilon_r \frac{h}{a} \quad (F/cm). \quad (3.3)$$

3.1.2.2 Der Induktionsbelag

Die wirksame Induktivität L einer Windung setzt sich aus Selbstinduktivität L_S und Gegeninduktivität M zusammen

$$L = L_S + M. \quad (3.4)$$

Um diese Induktivität L zu ermitteln, wird zunächst die Gegeninduktivität M^* zwischen zwei in Abb. 5 im Längsschnitt dargestellten koaxialen Zylinderspulen betrachtet.

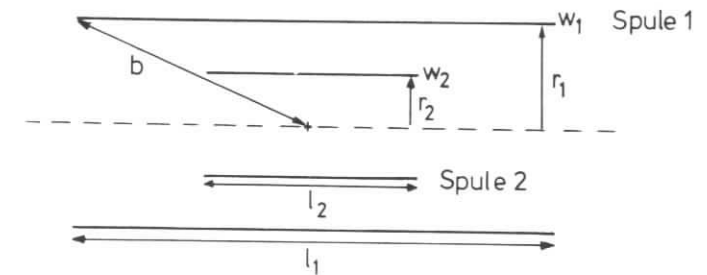


Abb. 5 Längsschnitt durch die beiden koaxialen Zylinderspulen

Die Formel für M^* lautet nach MEI 56

$$M^* = \frac{2 \pi^2 r_2^2 w_1 w_2}{b} \left\{ 1 + \frac{r_1^2 r_2^2 [3 - (l_2/r_2)^2]}{8 b^4} \right\} \quad (3.5)$$

Die verwendeten Abkürzungen haben folgende Bedeutungen:

- $l_{1, 2}$ = Länge der Spule 1, 2 (cm)
- $r_{1, 2}$ = Radius der Spule 1, 2 (cm)
- $w_{1, 2}$ = Windungszahl der Spule 1, 2
- b = $\sqrt{r_1^2 + (l_1/2)^2}$ (cm)

Formel (3.5) wird nun benutzt, um die Gegeninduktivität zwischen einer Windung mit Wendeldurchmesser und der gesamten Wendel zu berechnen. Abb. 6 zeigt die Anordnung der beiden sich überdeckenden Spulen. Spule 1 besteht aus allen gezeichneten Windungen, Spule 2 nur aus einer in der Mitte liegenden Windung. Beide Spulen überdecken sich in einer Windung in der Mitte von Spule 1.

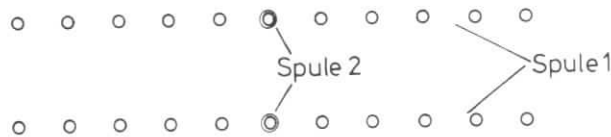


Abb. 6 Anordnung der beiden Spulen

Für diese Anordnung gilt:

- $r_1 = r_2 = D/2$
- $w_2 = 1$
- $w_1 = l/h$
- $l_2 = h$
- $l_1 = l$

mit l = Länge des Wendelrohres (cm)

Eingesetzt in Gleichung (3.5) erhält man

$$M^* = \frac{2 \pi^2 (D/2)^2 l}{b h} (1 + \delta) \quad (3.6)$$

mit $b = \frac{1}{2} \sqrt{D^2 + l^2}$
 und

$$\delta = \frac{(D/2)^4 [3 - (2h/D)^2]}{8 b^4}$$

Mit $D \ll l$ geht b in $l/2$ über und δ läßt sich wegen $\delta \ll 1$ vernach-

lässigen, so daß Formel (3.6) schließlich die einfache Form

$$M^* = \frac{\pi^2 D^2}{h} \quad (3.7)$$

annimmt.

Es tritt im allgemeinen ein Fehler auf, da die betrachtete Windung normalerweise nicht in der Rohrmitte liegt. Dieser Fehler ist jedoch im Hauptteil des Wendelrohres sehr klein und ist auch in der Nähe der Rohrenden gering. Genauere Rechnungen im Rahmen dieser Arbeit zeigen, daß für das Wendelrohr vom Typ A (siehe Tabelle 1) bereits bei einem Abstand von 0,5 cm vom Rohrende der Fehler kleiner 6 % ist.

M^* setzt sich insgesamt aus zwei Teilen zusammen. Der erste Teil ist die Gegeninduktivität M zwischen einer Wendelschleife und den anderen Windungen. Der zweite Teil ist die Gegeninduktivität zwischen der einen Wendelschleife und der an derselben Stelle liegenden Windung der Wendel. Das verdeutlicht Abb. 6. Die Gegeninduktivität zweier ineinanderliegender Windungen ist aber gerade die Selbstinduktivität L_s einer einzelnen Windung. Das bedeutet

$$M^* = L_s + M = L \quad (3.8)$$

M^* ist also bereits gleich der gesuchten wirksamen Induktivität L für eine Windung der Wendel. Mit dem Umfang $\pi \cdot D$ einer Windung erhält man schließlich den Induktionsbelag L' (= Induktivität pro Wendeldrahtlänge)

$$L' = \frac{\pi D}{h} \quad (\text{nH/cm}). \quad (3.9)$$

Das heißt, es gilt $L' \sim D$.

3.1.2.3 Wellenwiderstand und Laufzeit

Für den Wellenwiderstand Z_0 einer Verzögerungsleitung gilt die allgemeine Formel

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R' + j \omega L'}{G' + j \omega C'}} \quad (3.10)$$

Setzt man den Widerstandsbelag R' und den Ableitungsbelag G' gleich Null, so vereinfacht sich die Formel (3.10) zu

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad (\Omega). \quad (3.11)$$

Für die Laufzeit t'_0 pro Länge des Wendeldrahtes gilt für ein Signal niedriger Frequenz f

$$t'_0 = \sqrt{L' C'} = Z_0 C' = \frac{L'}{Z_0} \quad (\text{s/cm}). \quad (3.12)$$

Weil $L' \sim D$ ist, folgt $t'_0 \sim \sqrt{D}$.

Die Frequenz f sollte bei Benutzung der Formel (3.12) wesentlich kleiner als die 3 dB-Grenzfrequenz f_g der Verzögerungsleitung sein ($f \ll f_g$) (siehe unten Gleichung (3.16)).

Da die elektromagnetische Welle im Wendelrohr zwischen Wendel und Abschirmfolie konzentriert ist, gilt für die wirksame Länge s der Verzögerungsleitung

$$s = (D + a) \pi \frac{1}{h} \quad (\text{cm}). \quad (3.13)$$

Die Laufzeit t_0 über das gesamte Wendelrohr ist dann für $f \ll f_g$

$$t_0 = t'_0 s = t'_0 (D + a) \pi 1/h \quad (\text{s}). \quad (3.14)$$

Da $t'_0 \sim \sqrt{D}$ ist, gilt näherungsweise mit $a \ll D$ die einfache Beziehung

$$t_0 \sim D^{3/2}. \quad (3.15)$$

Das heißt, die Laufzeit t_0 hängt stark vom Rohrdurchmesser D ab.

Die Grenzfrequenz einer Verzögerungsleitung ist nach VAL 65

$$f_g = \frac{\sqrt{3} Z_0}{\pi R t_0} \quad (3.16)$$

wobei R der ohmsche Widerstand der Gesamtleitung ist.

Aus der Anstiegszeit der Wendelimpulse wurde abgeschätzt, aus welchen Frequenzkomponenten sich die durch Teilchen ausgelösten Impulse hauptsächlich zusammensetzen. Dabei ergab sich, daß die Beziehung $f \ll f_g$ nicht erfüllt ist. Es muß deshalb die Abhängigkeit der Induktivität von der Frequenz f berücksichtigt werden (KAL 46 und BLE 47). Das führt nach VAL 65 zu einer Laufzeitänderung

$$\Delta t = - \frac{1}{5} \left(\frac{f}{f_g} \right)^2 \quad (3.17)$$

Mit der Annahme, daß die übertragenen Frequenzen f nach oben durch f_g begrenzt sind, erhält man mit $f=f_g$ für die tatsächliche Laufzeit t über die gesamte Rohrlänge die Näherungsformel

$$t = 0,8 t_0 \quad (3.18)$$

Somit gilt auch für t

$$t \sim D^{3/2} \quad (3.19)$$

3.1.2.4 Berechnung der Wendelrohrparameter und Vergleich mit Messungen

Um die in den letzten Abschnitten beschriebenen Gleichungen zu überprüfen, wurden die Werte der elektrischen Parameter für zwei verschiedene Wendelrohre berechnet und mit gemessenen Werten verglichen. Die beiden Wendelrohre haben unterschiedliche Durchmesser, die Steigung der Wendel und der Abstand Wendel - Abschirmung sind jedoch gleich. In den Tabellen 1 und 2 sind die geometrischen und elektrischen Parameter der Rohre zusammengestellt. Beide Rohre werden im Detektor PLUTO verwendet: Wendelrohr Typ A im Schauerzähler und Wendelrohr Typ B in der innersten Proportionalkammer des Detektors.

Um den Kapazitätsbelag C' zu erhalten, wurde mit einer Meßbrücke die Kapazität des Wendelrohres zwischen Wendel und Abschirmung gemessen. C' erhielt man dann nach Division durch die Wendeldrahtlänge.

Um die relative Dielektrizitätskonstante ϵ_r der Rohrwandung der Wendelrohre zu bestimmen, wurde ein Zylinderkondensator mit demselben Dielektrikum gebaut, wie es in den Wendelrohren Verwendung findet (glasfaserverstärktes Araldit). Aus der gemessenen Kapazität und den geometrischen Abmessungen des Zylinderkondensators konnte ϵ_r berech-

net werden.

Der Wellenwiderstand Z_0 der Wendelrohre läßt sich mit Reflexionsmessungen ermitteln. Ein veränderlicher Abschlußwiderstand wird dazu so abgeglichen, daß die Reflexionen elektrischer Impulse am Rohrende ein Minimum erreichen. Mit einer Meßbrücke bestimmt man den eingestellten Widerstandswert und setzt ihn gleich dem gesuchten Wellenwiderstand.

Die tatsächliche Laufzeit t über das gesamte Wendelrohr wurde für viele Wendelrohre mit kosmischer Strahlung im Detektor PLUTO bestimmt (siehe Kap. 4.4). In den Tabellen 1 und 2 sind die Mittelwerte der Laufzeit t angegeben, berechnet aus 880 Rohren vom Typ A und 120 Rohren vom Typ B.

Der ohmsche Widerstand R der Wendel wurde mit Hilfe einer Meßbrücke bestimmt.

Wie man aus den Tabellen sieht, stimmen die berechneten und gemessenen Werte für C' , Z_0 und t gut überein.

Die Steigung h der Wendel und der Kapazitätsbelag C' sind für beide Wendelrohrtypen A und B gleich. Um die einfache Beziehung $t \sim D^{3/2}$ zu überprüfen, muß man deshalb die Laufzeiten der Rohre nur noch auf die gleiche Rohrlänge beziehen. Man erhält

$$\frac{t(B)}{670} / \frac{t(A)}{984} = 1,94$$

und

$$\left(\frac{D(B)}{D(A)} \right)^{3/2} = 1,88$$

Die Beziehung $t \sim D^{3/2}$ ist also gut erfüllt.

Anmerkung: Alle in den folgenden Kapiteln vorkommenden Wendelrohre sind vom Typ A ($D = 5,9$ mm).

Tabelle 1

Geometrische und elektrische Parameter für Wendelrohr Typ A, verwendet im Schauerzähler des Detektors PLUTO

a) geometrische Parameter

mittlerer Wendeldurchmesser	$D = 5,9$ mm
Durchmesser des Wendeldrahtes	$d = 0,2$ mm
Abstand zwischen der Mitte des Wendeldrahtes und der Abschirmung	$a = 0,65$ mm
Steigung der Wendel	$h = 0,5$ mm
Länge des Wendelrohres	$l = 984$ mm

b) elektrische Parameter

gemessen:

rel. Dielektrizitätskonstante	$\epsilon_r = 5,05 \pm 0,05$
ohmscher Widerstand der Wendel	$R = 22 \Omega \pm 1 \Omega$

berechnet:

Induktionsbelag	$L' = 37,1$ nH/cm
Grenzfrequenz	$f_g = 17,9$ MHz

	gemessen	berechnet
Kapazitätsbelag C'	$0,356$ pF/cm $\pm 0,03$ pF/cm	$0,344$ pF/cm
Wellenwiderstand Z_0	$354 \Omega \pm 17 \Omega$	328Ω
Laufzeit t	343 ns ± 12 ns (Mittelwert aus Messungen an 880 Rohren)	366 ns

Tabelle 2

Geometrische und elektrische Parameter für Wendelrohr Typ B, verwendet in der innersten Proportionalkammer des Detektors PLUTO

a) geometrische Parameter

mittlerer Wendeldurchmesser	$D = 9,0 \text{ mm}$
Durchmesser des Wendeldrahtes	$d = 0,2 \text{ mm}$
Abstand zwischen der Mitte des Wendeldrahtes und der Abschirmung	$a = 0,65 \text{ mm}$
Steigung der Wendel	$h = 0,5 \text{ mm}$
Länge des Wendelrohres	$l = 670 \text{ mm}$

b) elektrische Parameter

gemessen:

rel. Dielektrizitätskonstante	$\epsilon_r = 5,05 \pm 0,05$
ohmscher Widerstand der Wendel	$R = 23 \Omega \pm 1 \Omega$

berechnet:

Induktionsbelag	$L' = 56,5 \text{ nH/cm}$
Grenzfrequenz	$f_g = 17,2 \text{ MHz}$

	gemessen	berechnet
Kapazitätsbelag C'	$0,348 \text{ pF/cm} \pm 0,03 \text{ pF/cm}$	$0,344 \text{ pF/cm}$
Wellenwiderstand Z_0	$430 \Omega \pm 30 \Omega$	405Ω
Laufzeit t	$454 \text{ ns} \pm 37 \text{ ns}$ (Mittelwert aus Messungen an 120 Rohren)	453 ns

3.2 Die Herstellung der Wendelrohre

Am DESY wurde in der PLUTO-Gruppe im Jahre 1976 ein Verfahren zum Bau von Wendelrohren entwickelt (MAR 77 und SCH 77). Vorher von der Industrie gebaute Rohre erwiesen sich als mechanisch nicht genügend robust und hatten sehr große Toleranzen.

Die Herstellung der Wendelrohre gliederte sich in mehrere Arbeitsgänge, die im folgenden beschrieben werden.

3.2.1 Wickeln der Wendel und Aufbringen des Dielektrikums

Über eine Stahlstange (DIN-Silberstahl, 4,9 mm \emptyset) wurde ein Teflonschlauch mit einer Wandstärke von 0,4 mm geschoben. Als Gleithilfe war die Stange etwas eingefettet. Der Stab wurde in eine Wickelvorrichtung eingespannt und konnte mit einstellbarer Geschwindigkeit gedreht werden. Als Material für die Wendel wurde Cu-Draht (0,2 mm \emptyset) benutzt. Um eine konstante Wickelspannung zu erhalten, befand sich an der Rolle für den Wendeldraht eine Bremse. Sie wurde mit einer Federwaage auf 0,78 N (= 80 p) eingestellt. Die Wendel erhielt eine konstante Steigung von 0,5 mm. Das erreichte man durch eine Schnur (Nylonschnur, 0,3 mm \emptyset), die als Abstandsstück zwischen neuer und alter Windung entlangrutschte. Die Schnur wurde durch ein Gewicht zwischen den Windungen gehalten, das wird in Abb. 7 gezeigt. Beim Wickeln erfolgte die Führung des Drahtes mit der Hand. Anfang und Ende der Wendel wurden mit Klebeband (Scotch) auf dem Stab befestigt.

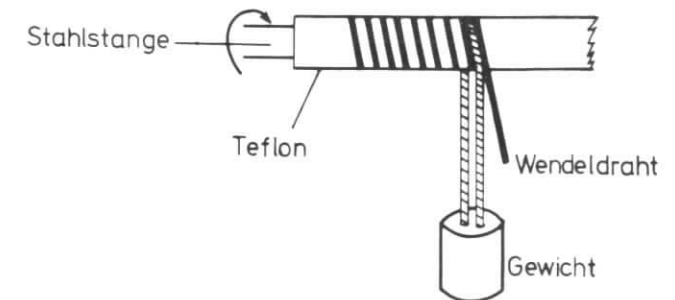


Abb. 7 Wickeln der Wendel

Über die gewickelte Wendelstange wurde ein fein gewebter Glasseidenschlauch geschoben und festgezogen. Die Befestigung erfolgte mit Klebeband (Scotch). Dann spannte man die mit Glasfaserschlauch überzogene Wendelstange in eine Drehvorrichtung ein. Während sich der Stab drehte, wurde das Seidengewebe gleichmäßig mit einem Pinsel mit Araldit (MK 43) getränkt. Danach kam der Stab zum Aushärten bei 50° C für 4 Stunden in einen Trockenschrank. Um die geforderte Wandungsstärke zu erhalten, wurde eine zweite Glasfaserschicht nach demselben Verfahren aufgebracht, mit Araldit getränkt und im Ofen ausgehärtet.

Die verwendete Stahlstange hatte eine Toleranz von $\pm 1/100$ mm im Durchmesser. Über die gesamte Wendelrohrlänge wurde der Durchmesser des mit Teflonschlauch überzogenen Stabes gemessen. Dabei erhielt man $5,7 \text{ mm} \pm 0,02 \text{ mm}$. Es war schwierig, Teflonschlauch mit sehr genauen Abmessungen und geringen Toleranzen zu bekommen. Deshalb wurde nur Schlauch aus derselben Herstellungsserie benutzt. Während der Fertigung wurden Stichproben gemacht, um die Toleranzen zu überwachen.

3.2.2 Feinarbeiten und Test

Durch die Verwendung des Teflonschlauches wurde ein Ankleben der Wendel an den Wickelkern verhindert. Deshalb konnten die Stahlstange und der Teflonschlauch mit Hilfe eines Flaschenzuges leicht aus dem Rohr herausgezogen werden.

Dann sägte man das Wendelrohr bis auf Normlänge (984 mm) ab. Mit einer Eisenstange, die mit Sandpapier umwickelt war, wurden ins Rohr gelaufene Aralditreste abgeschliffen. Der Staub wurde mit Stickstoff ausgeblasen, und von außen schmirgelte man das Rohr bis es durch eine Lehre (7,2 mm \emptyset) paßte.

Als Massestreifen diente eine 24 μm dicke Aluminium-Folie. Sie wurde mit einer Klebeschicht (Gudy - 0) versehen und um das Rohr geklebt. Die Folie war so bemessen, daß in der Abschirmung ein 1,0 mm breiter Schlitz entstand.

Es folgte die Beseitigung letzter Schmutzreste aus dem Rohrinnern. Dazu wurde ein mit Benzin getränktes Läppchen mit einer Stahlstange durch das Rohr geschoben. Die Wendel wurde an jedem Ende eineinhalb Windungen herausgezogen. Nach einem letzten Ausblasen mit Stickstoff wurden Plexiglas-Endstopfen in das Rohr gesteckt. Diese wurden so bemessen, daß sie stramm im Wendelrohr sitzen. Abb. 8 zeigt einen Schnitt durch das fertige Rohr. Die Endstopfen bestehen aus einer äußeren Hülse und einem inneren Stopfen mit einer Lötöse für den Zähldraht und zwei Löchern für die Gaszufuhr.

Als Zähldraht wurde vergoldeter Wolframdraht mit 30 μm Durchmesser verwendet. Mit einem kleinen Gewicht ließ man das Drahtende durch das Rohr fallen. Nachdem ein Ende festgelötet war, wurde der Zähldraht mit einer Masse von 50 g gespannt und das zweite Ende angelötet. Es folgte sofort ein Hochspannungstest an Luft mit 2,2 kV. War der Draht schadhaf, oder war noch Schmutz im Rohr, wurde der Zähldraht bei diesem Test zerstört. Die Lötstellen mit dem Wolframdraht erwiesen sich als sehr empfindlich. Deshalb erfolgte später ein mechanischer Test der Lötstellen. Dazu wurde eine Masse von 95 g für 3 Stunden an die Lötösen gehängt. Dabei wurde durch die Dehnung des Zähldrahtes der Endstopfen ein Stück aus dem Rohr gezogen. War die Lötstelle schlecht, rutschte der Draht sofort oder nach einiger Zeit aus der Lötung.

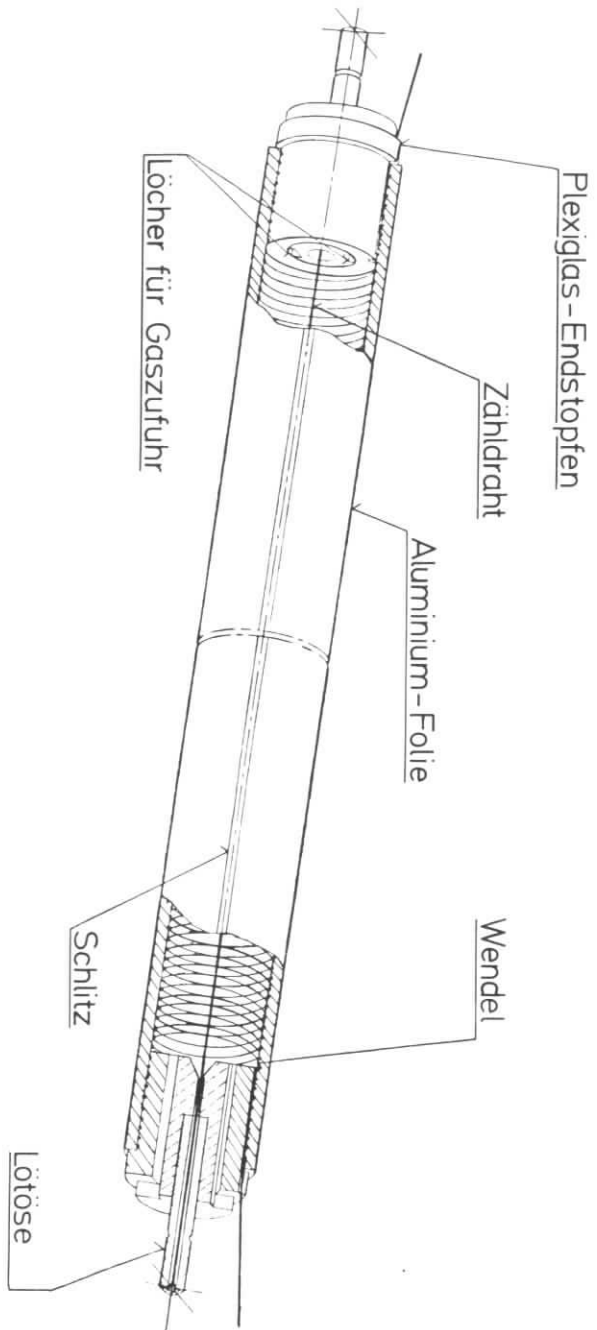


Abb. 8 Das Wendelrohr

3.2.3 Ergebnis der Fertigung

Ergebnis des am DESY entwickelten Herstellungsverfahrens ist ein mechanisch sehr robustes Wendelrohr. Selbst bei starken Biegungen des Rohres wird die Wendel nicht beschädigt. Die Zugfestigkeit ist größer 2158 N (= 220 kp). Eine Massenbelegung von 7,5 kg pro cm Länge vertragen die Rohr ohne Schaden.

Bisher wurden über 1000 Wendelrohre nach der oben beschriebenen Art gefertigt.

3.3 Die Ausleseelektronik

Die Ausleseelektronik für die Wendelrohre besteht aus zwei Vorverstärkern für Draht und Wendel und einem sogenannten Hauptverstärker. Der Hauptverstärker enthält einen Analog-Digitalwandler, an dessen Ausgang die gemessene Zeitdifferenz zwischen Draht- und Wendelimpuls als digitales Signal abgenommen werden kann.

3.3.1 Die Vorverstärker

Die Vorverstärker haben die Aufgabe, eine Verschlechterung des Signal-Störabstandes bei der Übertragung zum Hauptverstärker zu verhindern. Das geschieht durch Verstärkung der Wendelrohrimpulse und durch Anpassung des Vorverstärkerausgangswiderstandes an den Wellenwiderstand (50Ω) der Leitung zum Hauptverstärker. Der Eingangswiderstand der Vorverstärker ist ebenso groß wie der Wellenwiderstand Z_0 der Wendelrohre, so daß auch eingangsseitig eine Widerstandsanpassung vorliegt.

Die Verstärkung der Wendelsignale beträgt 8, die der Drahtsignale 4. Dadurch werden die unterschiedlichen Amplituden der beiden Eingangssignale (Kap. 3.4.2) aufeinander abgestimmt. Der Vorverstärker für die positiven Wendelimpulse invertiert außerdem die Eingangssignale, so daß am Hauptverstärker sowohl Wendel- als auch Drahtsignale mit gleicher negativer Polarität erscheinen. Bei -120 mV setzt an den Ausgängen der Vorverstärker eine Begrenzung ein.

Auf einer Verstärkerkarte befinden sich jeweils 8 Verstärkerkanäle. Das Übersprechen benachbarter Kanäle ist einschließlich aller Kabel $< 1\%$. Die verstärkten Signale werden über 14 m lange Vielfachkabel den Hauptverstärkern zugeführt. Die Eingangsschwellen der Hauptverstärker liegen bei 5 mV . Bezieht man diese Schwellen auf die Eingänge der Vorverstärker unter Berücksichtigung der Vorverstärkung und der Dämpfung des Kabels, ergibt sich:

- 1,8 mV Schwelle für Drahtsignale,
- 0,9 mV Schwelle für Wendelsignale.

Bei der Wahl der Schwellen muß ein Kompromiß zwischen zu großem Übersprechen und Beeinträchtigung der Nachweiswahrscheinlichkeit gemacht werden. Die Erfahrung hat gezeigt, daß bei einer geforderten Nachweiswahrscheinlichkeit von 99 % die mittlere Amplitude der Signale die Schwellen mindestens um den Faktor 10 übersteigen muß. Das ist bei der Dimensionierung der Wendelrohrelektronik berücksichtigt worden (vgl. Kap. 3.4.2). Die Vorverstärker besitzen Eingänge für Testpulsenergien, mit deren Hilfe die Funktionstüchtigkeit der Elektronik geprüft werden kann.

3.3.2 Der Hauptverstärker und das Prinzip der Digitalisierung

Die Zeitdifferenz Δt_f zwischen dem Startimpuls vom Zählrohr und dem Stopimpuls von der Wendel wird mit einem Analog-Digitalwandler als digitales Signal dargestellt. Dabei wird für die Digitalisierung eine Schaltung benutzt, die auf dem Prinzip der Zeitstreckung beruht. Dadurch erreicht man eine Auflösung von $0,5 \text{ ns}$ (= 1 Kanal), obwohl als Taktfrequenz nur 27 MHz (Periode $t_p = 37 \text{ ns}$) verwendet wird. Abb. 9 zeigt ein Prinzipschaltbild des Hauptverstärkers. Dieser besteht im wesentlichen aus zwei Impulsformern, zwei Integratoren, einem Komparator, einem Flipflop und einem 12 bit Zähler einschließlich einem als Tor wirkenden UND-Gatter. Der gesamte Hauptverstärker ist in TTL-Logik aufgebaut. Die vorverstärkten Draht- und Wendelimpulse gelangen jeweils an einen Diskriminator mit einer Schwelle von 5 mV . Die beiden Diskriminatoren liefern positive Rechteckimpulse mit einer Breite von 220 ns . Diese Impulse starten und stoppen Integrator 1.

Ein Integrator enthält eine Konstantstromquelle I und eine Kapazität C . Kommt ein Startimpuls, wird C von der Stromquelle I aufgeladen. Es gilt dabei für die Spannung $u(t)$ am Ausgang des Integrators nach der Zeit t

$$u(t) = \frac{I}{C} t \quad (3.20)$$

Das heißt, $u(t)$ steigt mit der Proportionalitätskonstante $k = I/C$ linear mit der Zeit t an.

Die Ausgangsspannung $u_1(t)$ von Integrator 1 steigt solange an, bis ein Stopimpuls nach der Zeit Δt_1 erscheint; $u_1(t)$ nimmt dann den Wert

$$U_b = u_1(\Delta t_1) + U_a = \frac{I_1}{C_1} \Delta t_1 + U_a = k_1 \Delta t_1 + U_a \quad (3.21)$$

an, wobei U_a die Spannung bedeutet, auf die der Kondensator zur Startzeit aufgeladen ist.

Soll ein Ereignis digitalisiert werden, liefert ein Trigger ungefähr 500 ns nach dem Draht-Start ein sogenanntes Strobe-Signal. Es startet Integrator 2 und setzt das Flipflop.

Die beiden Ausgangssignale der Integratoren 1 und 2 werden den Eingängen eines Komparators zugeführt. Das ist ein spezieller Differenzverstärker. Er vergleicht die Ausgangsspannungen $u_1(t)$ und $u_2(t)$ der beiden Integratoren. Abb. 10 zeigt eine schematische Darstellung des zeitlichen Verlaufs dieser Spannungen. Die Proportionalitätskonstante $k_2 = I_2/C_2$ des Integrators 2 ist wesentlich kleiner gewählt als die des Integrators 1. Die Ausgangsspannung $u_2(t)$ steigt daher nach dem Start durch das Strobe-Signal relativ langsam linear an. Wird $u_2(t)$ gleich U_b , schaltet der Komparator das Flipflop zurück. Das Flipflop war für die Zeit Δt_2 gesetzt.

Das Ausgangssignal des Flipflop und das Signal eines 27 MHz Taktgenerators stellen die Eingangssignale eines UND-Gatters dar. Der Ausgang des UND-Gatters führt zu einem 12 bit-Zähler. Je nach dem Ausgangssignal des Flipflop kann das 27 MHz-Signal das UND-Gatter passieren oder nicht. Das UND-Gatter hat also die Wirkung eines Tores für das 27 MHz-Signal. Durch das Setzen des Flipflop wird das Tor geöffnet, und der Zähler beginnt zu zählen. Das geschieht beim Eintreffen des Strobe-Signals. Der Zähler beendet das Zählen, wenn das Flipflop nach der Zeit Δt_2 zurückgesetzt wird.

Die Zeitkonstante k_1 des Integrators 1 ist 74mal so groß gewählt wie die des Integrators 2. Dadurch erhält man eine 74fache Zeitstreckung der gemessenen Zeit Δt_1 . Δt_1 liegt im Bereich zwischen 0 und 400 ns. Da 2 bit des Zählers für den Überlauf verwendet werden, bleiben 10 bit für die Zeitmessung übrig. Das sind 1024 Kanäle für die Anzeige des digitalisierten Laufzeitwertes. Ein Kanal entspricht dabei einer gemessenen Zeitdifferenz von 0,5 ns zwischen Draht und Wendelimpuls.

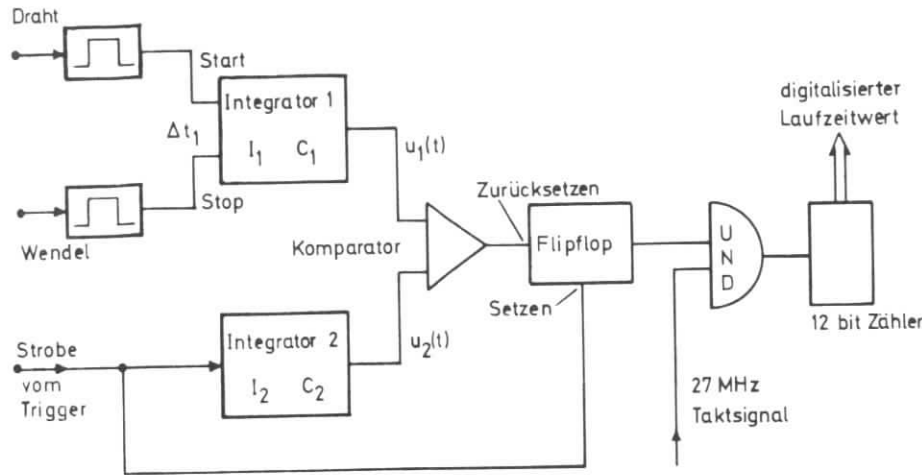


Abb. 9 Prinzipschaltbild des Hauptverstärkers

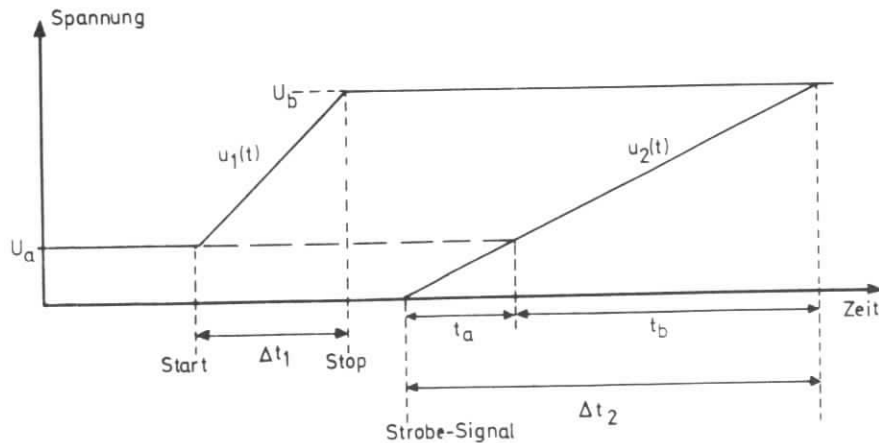


Abb. 10 Schematische Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Ausgangsspannungen $u_1(t)$ und $u_2(t)$ der beiden Integratoren. Man beachte: In der praktisch verwendeten Schaltung verhalten sich die Zeiten Δt_1 zu t_b wie $1/74$.

Die Stromquelle I_2 des Integrators 2 ist einstellbar. Mit ihr kann das Verhältnis der beiden Zeitkonstanten k_1 zu k_2 und damit die Zeitstreckung exakt abgeglichen werden. Integrator 1 besitzt eine Vorspannung U_a , das heißt die Kapazität C_1 ist mindestens auf die Spannung U_a aufgeladen. Mit dieser Vorspannung kann man einstellen, welche Zeit t_a der Zähler anzeigt, wenn Start und Stop gleichzeitig erfolgen. Es gilt

$$t_a = U_a/k_2 \quad (3.22)$$

und

$$\Delta t_2 = t_a + \frac{k_1}{k_2} \Delta t_1 \quad (3.23)$$

mit $k_1/k_2 = 74$.

U_a wird ungefähr so eingestellt, daß $t_a = 50 \times t_p = 1,85 \mu s$ beträgt. Das entspricht 50 Kanälen.

Die Auflösung bei der digitalen Zeitdifferenzmessung beträgt ± 1 Kanal = $\pm 0,5$ ns. Sie ist dadurch bestimmt, daß die Phase des 27 MHz-Taktgenerators nicht durch das Strobe-Signal gesteuert wird.

Wird ein Wendelrohrereignis ausgelesen, ist die Totzeit der Elektronik stark von der zu messenden Zeitdifferenz abhängig. Die maximale Totzeit beträgt $39 \mu s$. Sie ist so dimensioniert, daß sie noch unter der Zeit von $50 \mu s$ liegt, die die sequentielle Triggerlogik im Detektor PLUTO für die Spurenerkennung braucht.

Es ist wichtig, daß die Totzeit der Elektronik sehr klein ist, wenn ein Ereignis nicht ausgewertet werden soll. Es wird verlangt, daß das Strobe-Signal 400 bis 600 ns nach dem Wendelrohrstart auftreten muß. Ist das nicht der Fall, so wird der Kondensator C_1 in Integrator 1 in maximal 300 ns entladen. Wenn ein Ereignis nicht ausgelesen werden soll, ist somit die Totzeit der Elektronik $< 1 \mu s$ (ZIM 77).

3.4 Untersuchung von Wendelrohren mit einer radioaktiven Quelle

3.4.1 Der Testaufbau

Um die Eigenschaften der Wendelrohre zu untersuchen, wurde eine Testkammer aus 8 Rohren gebaut. Die Rohre wurden dabei in zwei Ebenen angeordnet mit einem Drahtabstand von 8,5 mm. Die beiden Ebenen waren um eine halbe Rohrbreite gegeneinander versetzt, so daß die Wendelrohre teilweise überlappten. Abb. 11 zeigt einen Querschnitt der Testkammer.

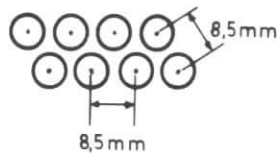


Abb. 11
Querschnitt durch die Testkammer

Die Anordnung der Rohre in der Wendelrohrkammer des Detektors PLUTO ist unter Vernachlässigung der Krümmung der Kammer dieselbe wie in der Testkammer (vgl. Kap. 4.2).

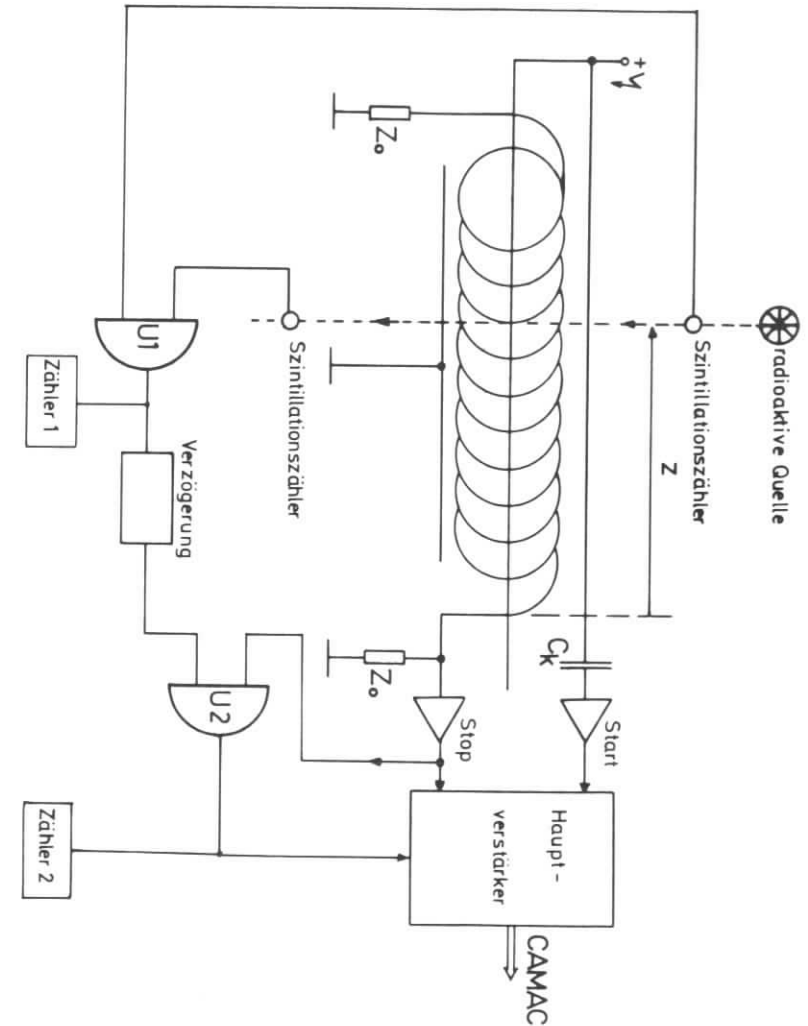
Als Gasfüllung für die Rohre diente ein Gemisch aus 90 % Argon und 10 % Propan. Das Gas durchströmte mit 0,05 Nl/min *) die Kammer; der Durchfluß ließ sich mit einem Blasenähler kontrollieren.

Der Test erfolgte mit einer radioaktiven ¹⁰⁶Ru-β-Quelle mit einer Radioaktivität von 9,25 x 10⁶ Becquerel (= 250 µCi). Die Maximalenergie der Elektronen dieser Quelle beträgt 3,54 MeV (LAN 61).

Abb. 12 zeigt ein Prinzipschaltbild des benutzten Testaufbaus. Zur besseren Übersicht ist stellvertretend für alle 8 Rohre nur eins dargestellt.

*) 1 Nl = 1 Normliter = 1 l Gas im Normzustand bei 0° C und 10135 N/m² Luftdruck; in der Gastechnik gebräuchliche Einheit

Abb. 12
Prinzipschaltbild des benutzten Testaufbaus



Die Wendeln der einzelnen Rohre sind an beiden Enden mit dem Wellenwiderstand Z_0 der Wendel abgeschlossen. Dadurch werden Reflexionen der auf der Wendel laufenden Impulssignale verhindert. Die Draht- und Wendelsignale werden zu entgegengesetzten Rohrseiten ausgelesen und über Vorverstärker einem Hauptverstärker zugeführt. Die Drahtauslese erfolgt über einen Kopplungskondensator C_k , um das eigentliche Signal von der Hochspannung abzutrennen. Die Drahtimpulse werden 4fach, die Wendelimpulse 8fach verstärkt. Der Hauptverstärker wandelt die Laufzeitdifferenz zwischen Zähl draht—Startimpuls und Wendel—Stopimpuls in ein digitales Signal um. Für die Vorverstärkung und Zeitdifferenzmessung wurde die in Kapitel 3.3 beschriebene Elektronik verwendet.

Um den Ort eines Elektronenstrahls von der Quelle genau zu definieren und den Untergrund durch kosmische Strahlung zu unterdrücken, wurden zwei Szintillationszähler verwendet. Sie waren vor und hinter der Testkammer im Strahl der Quelle angeordnet. Die Szintillatoren haben zylindrische Form mit 3 mm Durchmesser und 10 mm Länge. Sie waren beide gekreuzt angebracht unter einem Winkel von 90° mit einer gegenseitigen Überlappung von $3 \times 3 \text{ mm}^2$.

Der Abstand der radioaktiven Quelle von der Wendelausleseseite wurde als z-Wert bezeichnet.

Es sollten nur Ereignisse ausgewertet werden, wenn beide Szintillationszähler und mindestens ein Wendelrohr durch ein Teilchen ausgelöst wurden. Dies erreichte man durch folgende Anordnung.

Die beiden Szintillationszähler steuern die Eingänge eines UND-Gatters U1. Die Drahtausgänge der 8 Wendelrohre liefern die Eingangssignale für ein ODER-Gatter, dessen Ausgang einen Eingang eines zweiten UND-Gatters (U2) steuert. Über eine Verzögerung (von 140 ns) wird das Ausgangssignal von UND-Gatter 1 (U1) dem anderen Eingang von UND-Gatter 2 (U2) zugeführt. Die Verzögerung ist notwendig, damit es überhaupt zu der gewünschten Koinzidenz zwischen Szintillationszählern und Wendelrohren kommen kann; die Szintillatorsignale sind nämlich schneller als die Signale der Wendelrohre. Der Ausgang von

UND-Gatter 2 (U2) liefert schließlich das Strobe-Signal und steuert damit den Zeit-Digitalwandler. Nur wenn das Strobe-Signal erscheint, wird ein Ereignis digitalisiert.

Die digitalisierten Laufzeitdifferenzen wurden über eine CAMAC-Auslese (STU 70) in einen PDP 8 Rechner übertragen.

Mit dem von R. Pforte entwickelten Assemblerprogramm WERO konnte man die Meßwerte graphisch darstellen. Auf der Abszisse wurde die Laufzeit in Kanälen, auf der Ordinate die Zahl der Ereignisse pro Laufzeitintervall aufgetragen. Die Intervallbreite war wählbar.

Pro z-Wert wurden viele (n) Ereignisse gesammelt, um Mittelwert und Streuung der Laufzeitdifferenz t zu ermitteln. Für den mittleren Fehler des Mittelwertes gilt dann:

$$\sigma_{\text{Mittelwert}} = \sqrt{\frac{\text{Streuung}}{n}} \quad (3.24)$$

Dadurch ist es möglich, die Laufzeitdifferenz durch viele Messungen sehr genau zu bestimmen, zum Beispiel genauer als die Auflösung der Elektronik für ein Ereignis.

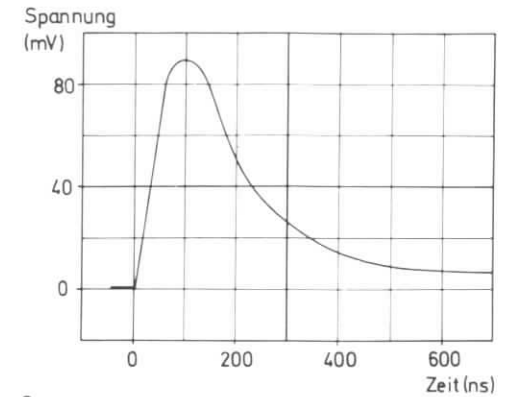
3.4.2 Die Impulsformen

Die am Wendelrohr auftretenden Spannungsimpulse wurden mit einem Oszilloskop untersucht. Abb. 13 zeigt typische Impulsformen von Zählrohr und Wendel für eine Anodenspannung von 1380 V gemessen mit der ^{106}Ru -Quelle. Bei der Messung lag eine wirksame Impedanz von 600Ω und 140 pF vor. Das Wendelsignal ist positiv, das Zählrohrsignal ist negativ. Die Anstiegszeiten beider Signale sind für kleine Laufzeiten des Wendelimpulses (z -Wert = 5 cm) gleich und betragen 45 ns (Abb. 13 a) und b)). Für die Abfallszeit der Signale erhält man 500 ns.

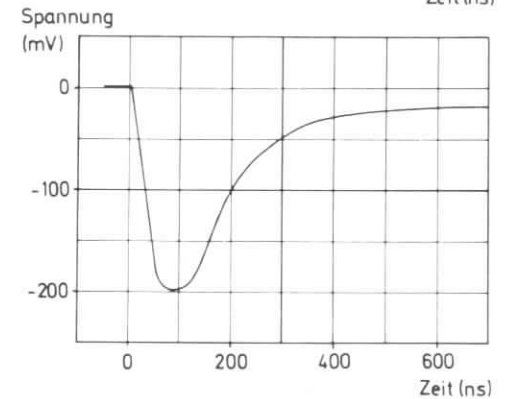
Bei großen Laufzeiten steigt die Anstiegszeit des ausgelesenen Wendelimpulses durch Dispersion an, und es entsteht ein kleiner negativer Impuls vor dem eigentlichen positiven Hauptimpuls. Dieser Effekt ist in Abb. 13 c) für einen z -Wert von 90 cm dargestellt. Die Anstiegszeit des Wendelimpulses erreicht einen maximalen Wert von 55 ns nach einer Laufzeit von ungefähr 340 ns über die gesamte Wendel.

Die Amplitude der Zählrohrimpulse ist ungefähr doppelt so groß wie die der Wendelimpulse. Das läßt sich folgendermaßen erklären: Auf der Wendel teilt sich das influenzierte Signal in zwei Impulse auf, die zu entgegengesetzten Seiten auseinanderlaufen. Da die Wendel auf beiden Seiten mit dem Wellenwiderstand Z_0 abgeschlossen ist, kommt es zu keinen Reflexionen an den Rohrenden. Das auf dem Zählrohr entstandene Signal teilt sich ebenfalls auf. Es kommt jedoch zu einer Reflexion am offenen Ende des Drahtes. Da die Laufzeit über den Zählrohr mit ungefähr 5 ns wesentlich kleiner ist als die Anstiegszeit der Impulse, wird das reflektierte Signal zum ausgelesenen Signal dazuaddiert. Die Amplitude des Zählrohrimpulses ist somit doppelt so groß wie die des Wendelimpulses.

a) Wendelsignal, Quelle nahe der Ausleseseite
Maßstab:
vertikal 20 mV/Einheit
horizontal 100 ns/Einheit



b) Zählrohrsignal
Maßstab:
vertikal 50 mV/Einheit
horizontal 100 ns/Einheit



c) Wendelsignal, Quelle bei $z = 90 \text{ cm}$
Maßstab:
vertikal 20 mV/Einheit
horizontal 100 ns/Einheit

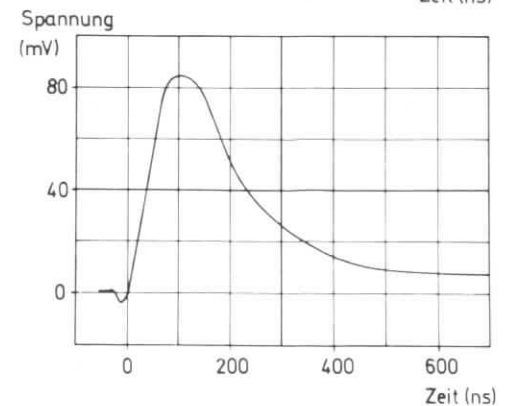


Abb. 13 Impulsformen von Zählrohr und Wendel bei einer Anodenspannung von 1380 V gemessen mit einer radioaktiven ^{106}Ru - β -Quelle

Die Amplitude des Wendesignals sinkt, bedingt durch den ohmschen Widerstand der Wendel, um ungefähr 5 % ab, nachdem es über die gesamte Verzögerungsleitung gelaufen ist.

Mit dem Oszilloskop wurde die mittlere Amplitude der Zähldrahtimpulse in Abhängigkeit von der Anodenspannung bei Verwendung der ^{106}Ru -Quelle gemessen. Abb. 14 zeigt das Ergebnis. Die Ordinate ist logarithmisch aufgeteilt und die Schwankung der Impulshöhen wird als Fehlerbalken dargestellt. Die Impulshöhe steigt bei Erhöhung der Anodenspannung bis auf 1410 V zunächst stark an, dann wird sie nahezu konstant mit einem Wert von 320 mV. Die gemessene Abhängigkeit ist vereinbar mit der Beobachtung, daß ab $U_G = 1410$ V Anodenspannung die ersten Geigerimpulse erscheinen.

Mit kosmischer Strahlung arbeiten die Wendelrohre bis zu einer Anodenspannung von 1700 V ohne Überschlüge der Hochspannung.

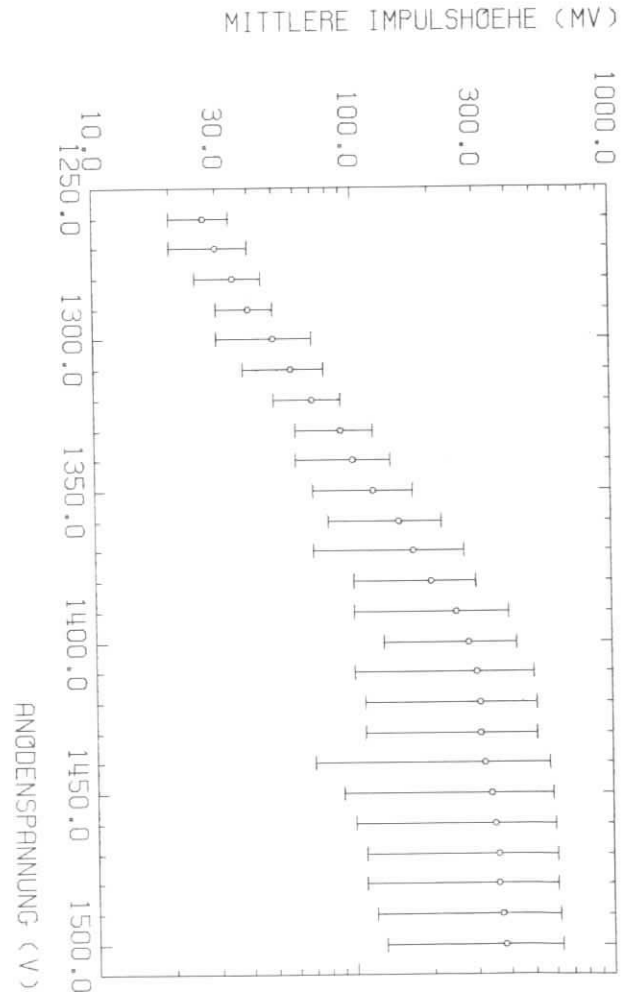


Abb. 14 Abhängigkeit der mittleren Impulshöhe der Zähldrahtsignale von der Anodenspannung

3.4.3 Die Nachweiswahrscheinlichkeit

Die Nachweiswahrscheinlichkeit η der Testkammer relativ zu den beiden Szintillationszählern wurde mit Hilfe des beschriebenen Testaufbaus bestimmt. Ein Zähler zählte die Koinzidenzen $Z1$ der beiden Szintillationszähler am Ausgang des UND-Gatters 1 ($U1$). Ein zweiter Zähler diente dazu, die Dreifach-Koinzidenzen $Z2$ aus Testkammersignalen und Szintillatorkoinzidenz zu zählen. Das geschah am Ausgang des UND-Gatters 2 ($U2$) (siehe Abb. 12, S. 32). Die Nachweiswahrscheinlichkeit η läßt sich daraus mit der Formel

$$\eta = Z2/Z1 \quad (3.25)$$

berechnen.

Abb. 15 zeigt die gemessene Plateaukurve in Abhängigkeit von der Anodenspannung für die Mitte der Testkammer. Ab 1310 V ist die Nachweiswahrscheinlichkeit nahezu konstant und beträgt im Mittel 99 %. Die Plateaulänge für den Proportionalbereich beträgt 100 V, denn ab 1410 V setzen die Geigerimpulse ein. Eine Meßreihe zeigt, daß die Nachweiswahrscheinlichkeit unabhängig vom Ort entlang der Rohre ist.

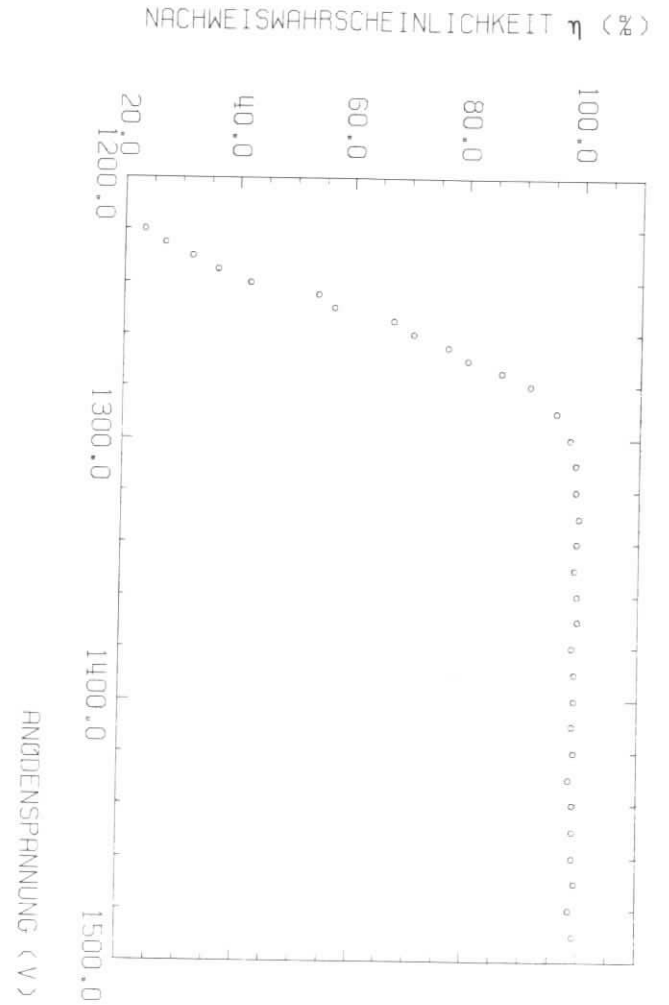


Abb. 15 Nachweiswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Anodenspannung

3.4.4 Die Ortsauflösung

Die Ortsauflösung in z-Richtung wurde mit der radioaktiven Quelle gemessen. Die Quelle war dazu mit einem Kollimator aus 5 mm starkem Messing und einer Öffnung von 1,5 mm Durchmesser versehen. In Schritten von 50 mm wurde die Quelle mit den beiden Szintillationszählern für jede Messung verschoben. Man erhielt Laufzeithistogramme für jeden z-Wert mit dem PDP8-Rechner mit Hilfe des Programms WERO.

Abb. 16 zeigt die gemessenen Verteilungen über die gesamte Rohrlänge. Die Laufzeitdifferenz ist bereits in Länge umgerechnet.

Aus dem Mittelwert der Halbwertsbreiten der Laufzeithistogramme wurde die Auflösung zu 1,4 ns bestimmt, das entspricht einer z-Auflösung von $\sigma = 3,7$ mm. Dieser Wert muß noch auf die Breite der Quelle korrigiert werden. Bei den Messungen wurde festgestellt, daß die wirksame Strahlbreite hauptsächlich durch die Szintillationszähler bestimmt wird. Es wird deshalb die Annahme gemacht, daß das Strahlprofil ungefähr eine Rechteckverteilung mit der Breite der Szintillationszähler ist. Für die Standardabweichung σ_n einer Rechteckverteilung der Breite b gilt die einfache Formel

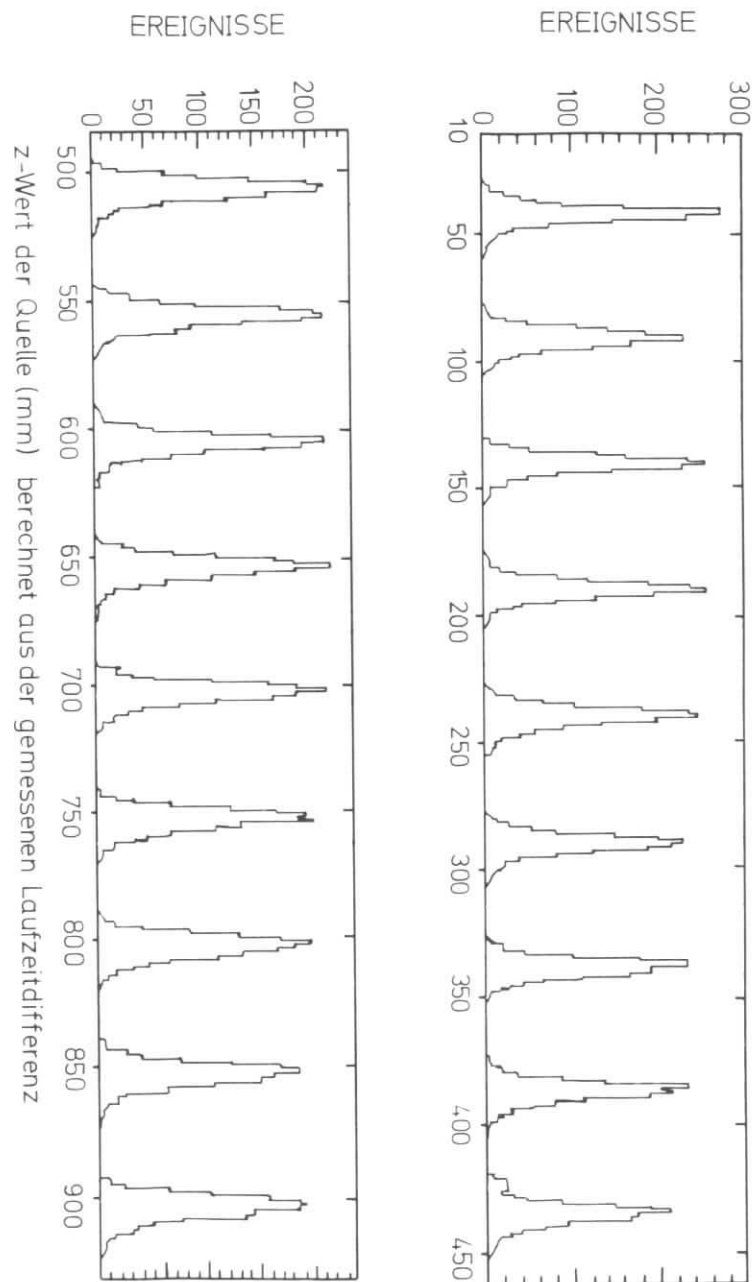
$$\sigma_n = \frac{b}{\sqrt{12}} \quad (3.26)$$

Das ergibt $\sigma_{\text{Strahl}} = \frac{3 \text{ mm}}{\sqrt{12}} = 0,9 \text{ mm}$.

Man erhält durch die Korrektur $\sigma_p^2 = \sigma^2 - \sigma_{\text{Strahl}}^2$ für die Ortsauflösung $\sigma_p = 3,6$ mm, gemittelt über die gesamte Rohrlänge. Die Auflösung verbessert sich zum Ausleseende hin um 0,5 mm; für das andere Rohrende ergibt sich eine Verschlechterung um den gleichen Wert.

Die Auflösung der Elektronik von ± 1 Kanal- das entspricht ungefähr $\pm 1,3$ mm - ist somit gut auf die z-Auflösung der Wendelrohre abgestimmt.

Abb. 16 Ortsauflösung der Wendelrohre, gemessen mit der ^{106}Ru -Quelle. Die Quelle wurde in Schritten von 50 mm verschoben.



3.4.5 Die Linearität

Um die Linearität der Wendelrohre und der dazugehörigen Elektronik zu prüfen, wurde die Laufzeitdifferenz zwischen Draht und Wendelimpuls in z-Schritten von 20 mm gemessen. Für jeden z-Wert wurde eine Laufzeitverteilung mit dem Programm WERO aufgenommen.

Eine gute Genauigkeit des z-Wertes erreichte man dadurch, daß die radioaktive Quelle und beide Szintillationszähler fest stehenblieben. Nur die Testkammer wurde auf einer Lehre verschoben. Auf diese Weise war sichergestellt, daß sich die Strahldefinition nicht veränderte. Mit der Methode gelang es, den Fehler der z-Einstellung auf $\pm 0,1$ mm herabzudrücken. Die Messung wurde für alle 8 Rohre der Testkammer über die gesamte Rohrlänge durchgeführt. Abb. 17 zeigt die gemessene Linearitätskurve für ein typisches Wendelrohr.

Jeder Laufzeitmeßwert stellt dabei den Mittelwert der erhaltenen Laufzeitverteilung dar und setzt sich aus etwa 1000 einzelnen Ereignissen zusammen. Der Fehler in der Zeitmessung ist deshalb nach Formel (3.24) (vgl. Kap. 3.4.1)

$$f_t = \frac{1,4 \text{ ns}}{\sqrt{1000}} = \pm 0,04 \text{ ns}$$

und kann vernachlässigt werden.

Um die Abweichung vom linearen Verlauf zu bestimmen, wurde nach dem Prinzip der kleinsten Fehlerquadrate eine Gerade

$$\hat{t}(z) = az + t_k \tag{3.27}$$

durch die n Meßpunkte (t_i, z_i) , $i = 1 \dots n$ gelegt. Ein Stück von 1,5 cm Länge an jedem Rohrende wurde für die Geradenbestimmung nicht benutzt, da dort größere Nichtlinearitäten beobachtet wurden. Die mittlere Abweichung δt der gemessenen Laufzeitdifferenz t_i von dem aus der Geraden erhaltenen Wert \hat{t}_i wurde nach der Formel (ZUR 65)

$$\delta t = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{t}_i - t_i)^2}{n-2}} \tag{3.28}$$

mit $\hat{t}_i = \hat{t}(z_i) = az_i + t_k$

berechnet.

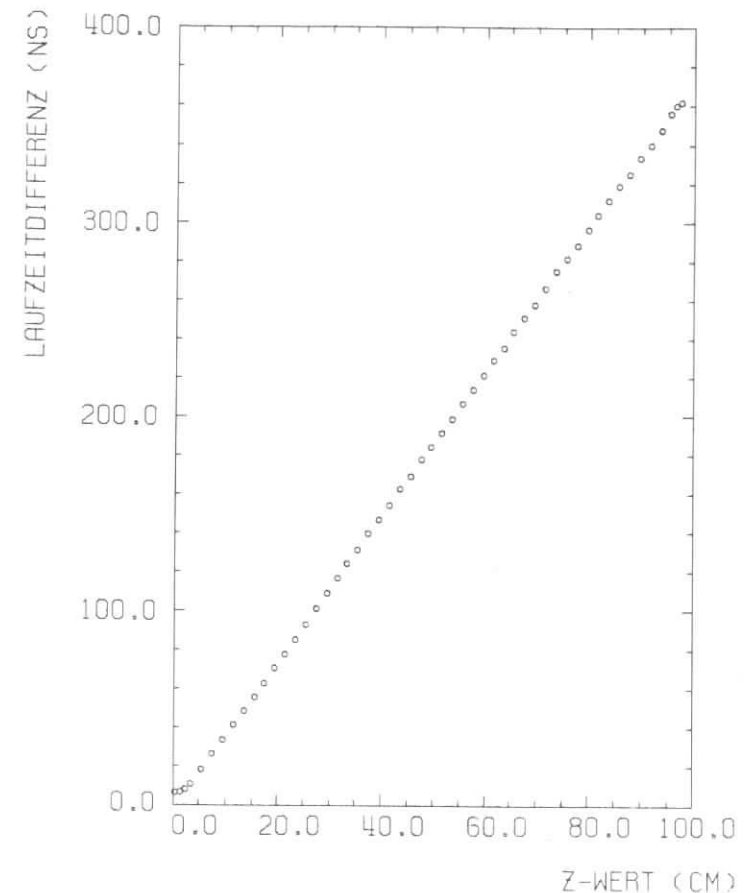


Abb. 17 Linearitätskurve für ein typisches Wendelrohr

Als Mittelwert für alle 8 Rohre ergibt sich $\delta t = 0,75$ ns. Das entspricht in z einer Nichtlinearität von $\sigma_1 = \frac{\delta t}{a} = 2,0$ mm. Die größte gemessene Nichtlinearität für ein Einzelrohr beträgt $\sigma_1 = 2,3$ mm. Die gemessene Nichtlinearität setzt sich aus der Nichtlinearität der Rohre und der Elektronik zusammen. Die Steigungen a der Linearitätsgeraden sind von Rohr zu Rohr verschieden. Für die 8 Rohre der Testkammer erhält man für 1/a Werte zwischen 2,80 mm/ns und 2,50 mm/ns mit einem Mittelwert von 2,66 mm/ns. Das bedeutet, daß bei Verwendung mehrerer Rohre in einem Detektor jedes Rohr einzeln geeicht werden muß. Die unterschiedlichen Steigungen der Laufzeitgeraden können aus der Fertigung der Rohre erklärt werden (Kap. 3.2). Da das Festziehen des Glas-seidenschlauches mit der Hand geschieht, kann es von Rohr zu Rohr zu Änderungen im Kapazitätsbelag kommen. Auch Schwankungen in der Dicke des Teflonschlauches sind zusätzliche Erklärungsmöglichkeiten (vgl. Formel (3.19) S. 16).

Die Abweichung der gemessenen Linearitätskurve am Rohrende vom linearen Verlauf (Endeffekt) wurde bei GR0 72 ebenfalls beobachtet. Dort wird eine Proportionalkammer beschrieben, die nach dem gleichen Prinzip der z-Auslese mit einer Verzögerungsleitung arbeitet. Die Endeffekte werden mit dem Abfall der Gegeninduktivität am Ende der dort verwendeten Verzögerungsleitung erklärt.

Diese Erklärungsmöglichkeit wurde an den Wendelrohren untersucht. Genauere Rechnungen im Rahmen dieser Arbeit ergaben jedoch, daß der theoretisch berechnete Effekt zu gering ist, um damit die gemessenen Nichtlinearitäten erklären zu können.

3.4.6 Die Abhängigkeit der gemessenen Laufzeitdifferenz von der Anodenspannung

Um zu untersuchen, ob eine Abhängigkeit der gemessenen Laufzeitdifferenz von der Anodenspannung besteht, wurde die radioaktive Quelle mit beiden Szintillationszählern an einen konstanten z-Wert gestellt. Die Messung der Laufzeitverteilungen erfolgte bei mehreren Hochspannungswerten, wobei sich jede gemessene Verteilung aus etwa 1000 Ereignissen zusammensetzt.

Für jeden Spannungswert wurde der Mittelwert der Verteilung bestimmt und gegen die dazugehörige Spannung aufgetragen. Der Fehler in der Zeitmessung ist dann nach Kap. 3.4.5 $\pm 0,04$ ns.

Abb. 18 zeigt das Meßergebnis mit der radioaktiven Quelle bei $z = 90$ cm. Die Kurve steigt zunächst steil an bis zu einer Anodenspannung von ungefähr $U_T = 1350$ V. Danach flacht sie ab und hat eine Steigung von etwa 5 ns/100 V. Man kann annehmen, daß die gemessene Abhängigkeit der Laufzeitdifferenz von der Anodenspannung bei konstantem z-Wert durch folgende Effekte hervorgerufen wird.

1. Abhängigkeit der Impulsformen von der Anodenspannung (SAU 77)
2. Pulsverformung der Wendesignale durch Dispersion auf der Verzögerungsleitung (Kap. 3.4.2)

Der beste Arbeitsbereich der Wendelrohre wird durch U_T und U_G (Kap. 3.4.2) begrenzt und liegt im Plateaubereich der Nachweiswahrscheinlichkeit. Es erscheint deshalb vernünftig, den günstigsten Arbeitspunkt U_A der Wendelrohre mit der Formel

$$U_A = U_T + \frac{U_G - U_T}{2} \quad (3.29)$$

auf 1380 V zu legen.

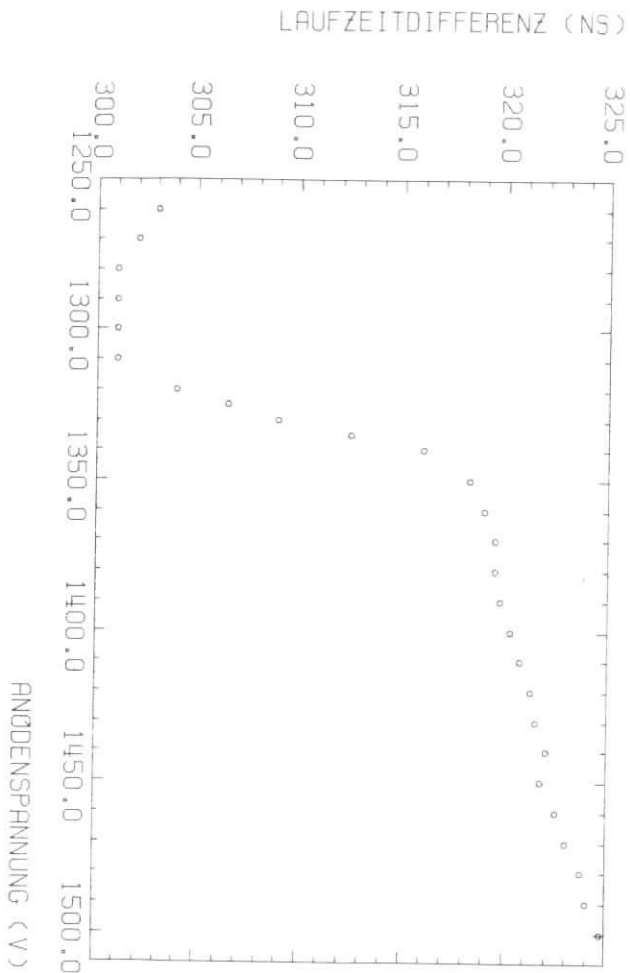


Abb. 18
 Abhängigkeit der gemessenen Laufzeitdifferenz von der Anodenspannung, ^{106}Ru Quelle bei $z = 90$ cm

4. Die Anwendung von Wendelrohren im Detektor PLUTO

4.1 Der Detektor PLUTO

PLUTO ist ein magnetisches Spektrometer für e^+e^- Speicherringexperimente. Der Detektor PLUTO setzt sich aus drei verschiedenen Komponenten für den Nachweis geladener Teilchen zusammen, dem Innendetektor, einem Schauerzähler und dem Außendetektor. Abb. 19 zeigt einen Querschnitt durch PLUTO.

Der Innendetektor besteht aus 12 zylindrischen Proportionaldrahtkammern, die konzentrisch zur Strahlachse des e^+e^- Speicherringes angebracht sind. Im Mittelpunkt des Detektors befindet sich der Wechselwirkungspunkt des Elektronen- und Positronenstrahles.

Ein tonnenförmiger Schauerzähler in Blei-Szintillator-Bauweise mit einer wirksamen Dicke von 9,2 Strahlungslängen umschließt den Innendetektor. JEN 77 gibt eine genaue Beschreibung des Schauerzählers.

Der Schauerzähler hat die Aufgabe, Elektronen und Photonen zu erkennen. Zur unabhängigen Messung des Schauerortes ist nach 3,9 Strahlungslängen eine zylindrische Wendelrohrkammer im Schauerzähler eingebaut. Im folgenden Abschnitt wird die Geometrie der Kammer beschrieben.

Innendetektor und Schauerzähler befinden sich im Inneren einer supraleitenden zylindrischen Spule (Solenoid) mit einem Innendurchmesser von 1,4 m und einer Länge von 90 cm. Mit Hilfe des Solenoids kann ein Magnetfeld von maximal 1,7 Tesla am Ort des Wechselwirkungspunktes erzeugt werden. Dadurch ist es möglich, die Impulse geladener Teilchen zu bestimmen.

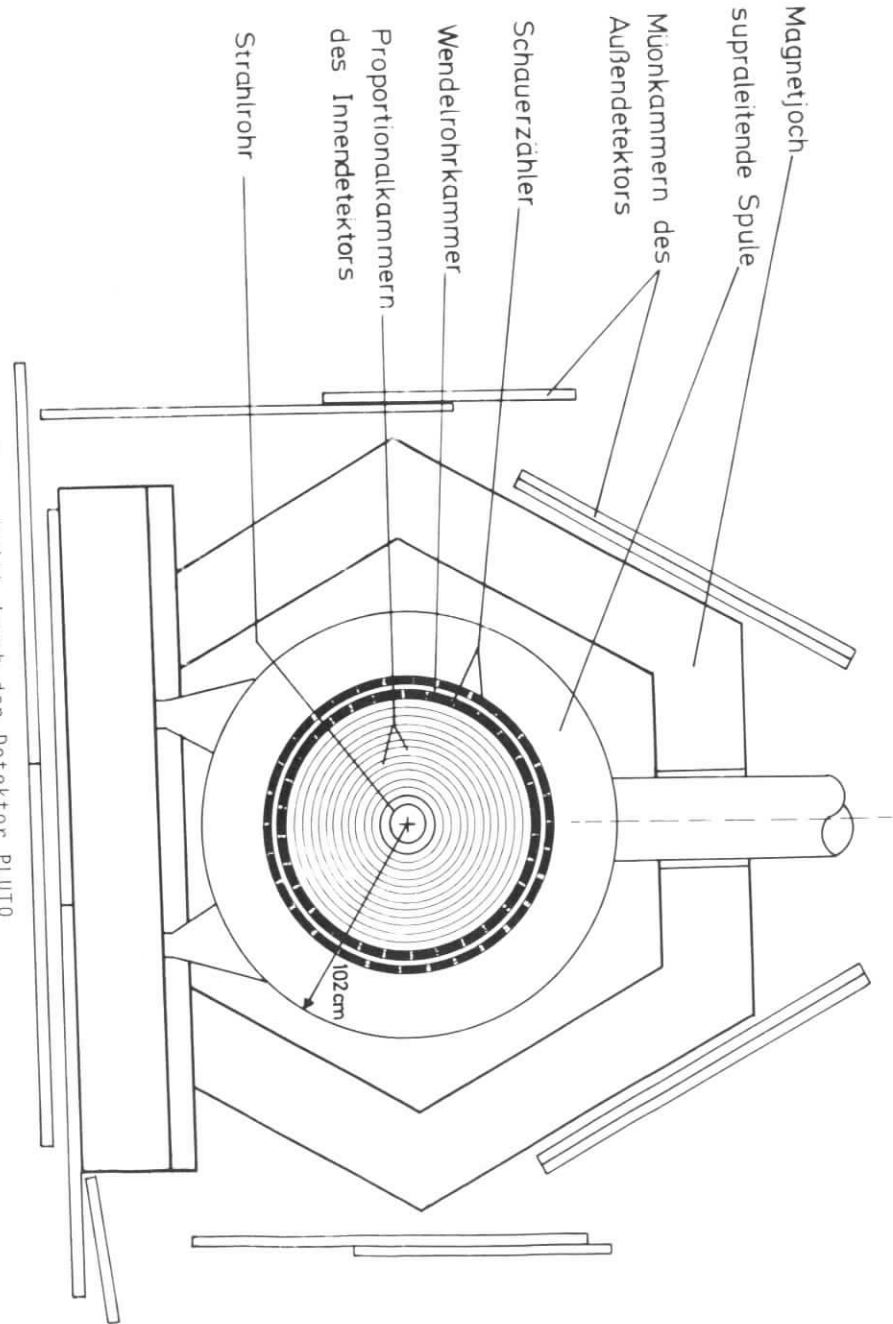


Abb. 19 Querschnitt durch den Detektor PLUTO

Der magnetische Fluß wird außerhalb der Magnetspule über ein Eisenjoch zurückgeführt. Das Joch stellt außerdem einen guten Hadronenabsorber dar.

Außerhalb des Magnetjochs befindet sich der Außendetektor, bestehend aus großflächigen Proportionalrohrkammern (Müonkammern). Sie dienen zum Nachweis von Müonen, die das abschirmende Eisenjoch durchdringen.

Die Einzelheiten des Detektors PLUTO werden im PLUTO-Handbuch (PLU 74) ausführlich beschrieben.

4.2 Die Geometrie der Wendelrohrkammer im Detektor PLUTO

Die Wendelrohrkammer im Schauerzähler des Detektors PLUTO besteht aus einem großflächigen zylindrischen System von 880 Wendelrohren des Typs A (siehe Tabelle 1). Die Wendelrohrkammer ist das fünfzehnte Detektorelement im PLUTO und heißt deshalb auch kurz Kammer 15.

Abb. 20 zeigt einen Querschnitt durch einen Teil des Schauerzählers mit Kammer 15. Die Höhe der Wendelrohrkammer beträgt 16 mm. Die Wendelrohre liegen parallel zur Zylinderachse des PLUTO-Solenoids und sind in zwei Lagen bei den Radien $R_1=635$ mm und $R_2=642$ mm angeordnet.

Der Abstand der Zähldrähte in der inneren Lage beträgt $t_i = 8,45$ mm, in der äußeren Lage $t_a = 8,54$ mm. Die beiden Rohrlagen sind gegeneinander versetzt, so daß die Rohre einer Lage gerade die Lücken zwischen den Rohren der anderen Lage überdecken. Die Überdeckung beträgt 74,2 %. Im Detektor PLUTO wird ein zylindrisches (R, PHI, Z) und ein kartesisches (X, Y, Z) Koordinatensystem verwendet. Abb. 21 zeigt einen Längsschnitt durch den Zylinder und die Definition der Z-Koordinate. Im Gegensatz zur bisherigen Festlegung ist $Z=0$ jetzt in der Mitte der Wendelrohre. Die Wendelausleseseite befindet sich an der Seite mit positiven Z-Werten, die Drahtauslese auf der gegenüberliegenden Seite.

Abb. 22 zeigt einen Querschnitt durch den Zylinder, wenn man von der +Z-Seite (PLUTO Kontrollraum) auf den Detektor schaut. Die Definitionen der R-, PHI-, X- und Y-Koordinate kann man der Abbildung entnehmen. Der verwendete PHI-Bereich läuft von -180° über 0° bis 180° .

Der Wechselwirkungspunkt der e^+e^- -Annihilation befindet sich auf der Zylinderachse bei $Z=0$ und $R=0$ bzw. bei $X=0$, $Y=0$ und $Z=0$.

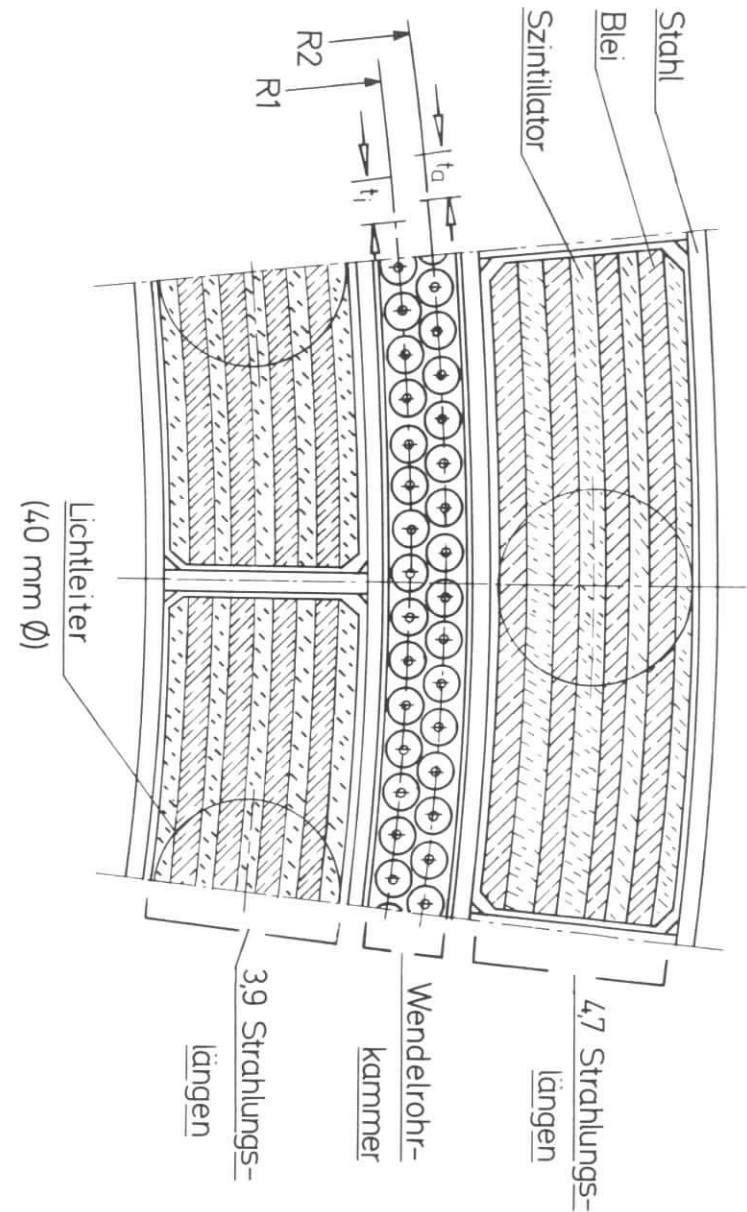


Abb. 20
Querschnitt durch einen Teil des Schauerzählers mit der Wendelrohrkammer

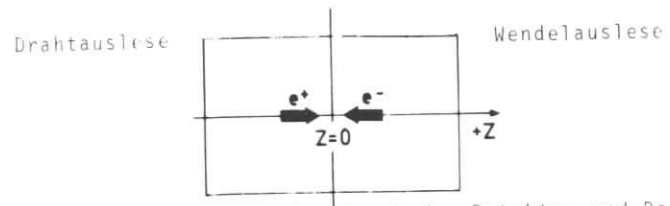


Abb. 21 Längsschnitt durch den Detektor und Definition der Z-Koordinate

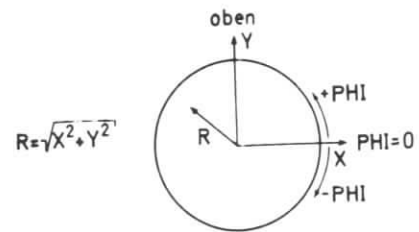


Abb. 22 Querschnitt durch den Detektor und Definition der R-, PHI-, X- und Y-Koordinate

Die Wendelrohrkammer 15 besteht aus insgesamt 10 einzelnen Segmenten mit jeweils 88 Rohren. Die Segmente können leicht in die Aussparungen zwischen den beiden Schauerzählerringen geschoben werden. Abb. 23 zeigt wie ein Einzelsegment gerade eingebaut wird.

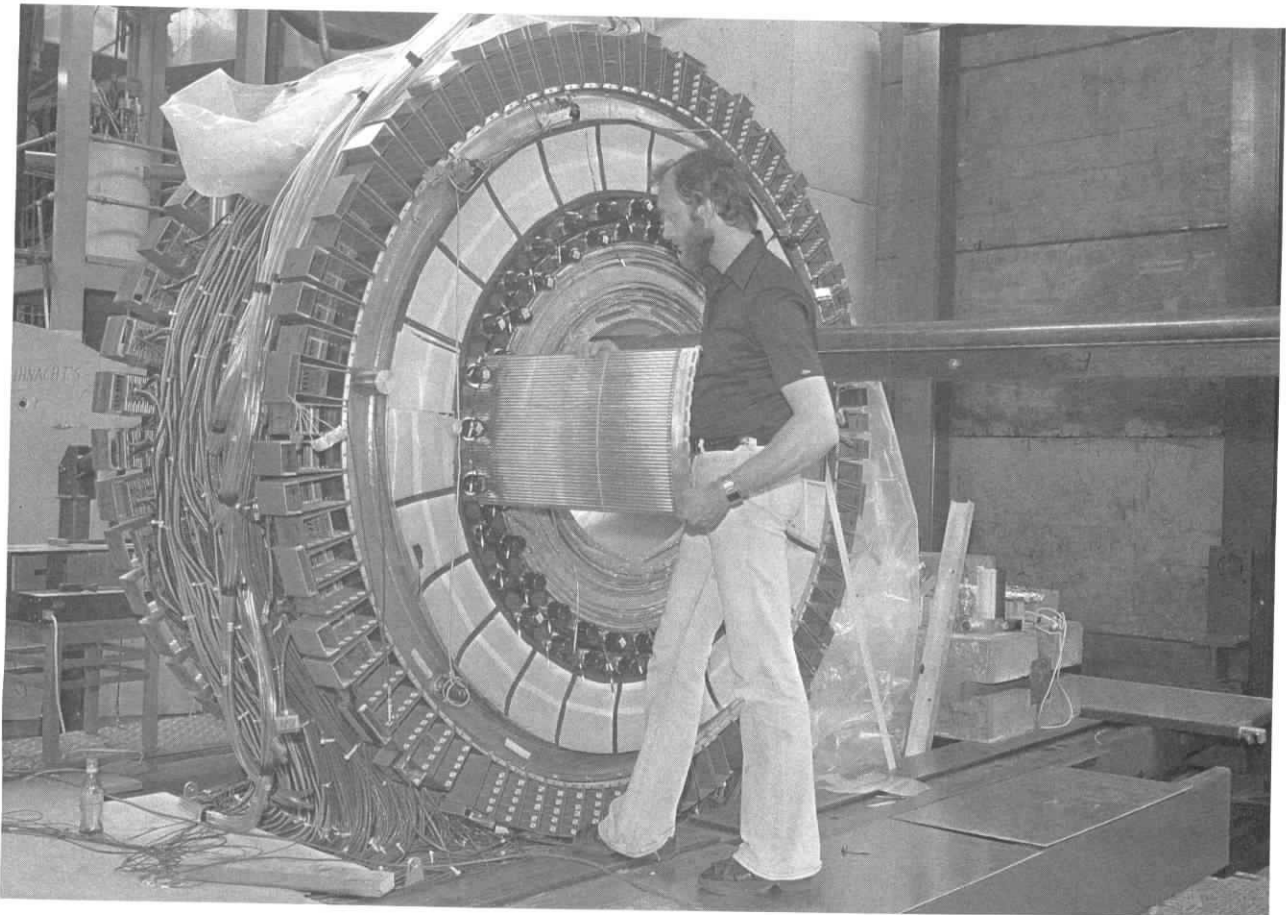


Abb. 23 Einbau eines Wendelrohrsegments in den Schauerzähler

Jedes Segment überdeckt in der PHI-Koordinate etwas weniger als 36° , da sich 1 cm breite Stahlstege zur Abstützung der Blei-Szintillator-Zähler zwischen den einzelnen Segmenten befinden. Abb. 24 zeigt den Rand eines Segments im Querschnitt. Man sieht dabei das Gebiet der Kammer, in dem sich keine Rohre befinden. Insgesamt wird in PHI $94,5\%$ von 360° durch die Wendelrohre der Kammer 15 bedeckt.

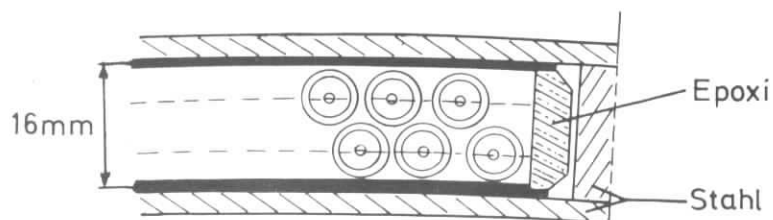


Abb. 24 Rand eines Wendelrohrsegments im Querschnitt

Die Wendelrohre sind fortlaufend durchnummeriert von 0 bis 879. Die Rohre mit den geraden Nummern liegen in der inneren Lage (Radius R1), die mit den ungeraden Nummern in der äußeren Lage (Radius R2) der Kammer. Dabei befindet sich Rohrnummer 0 bei $\text{PHI} = 1,72^\circ (= 30,1 \text{ mrad})$. Der Abstand zweier aufeinanderfolgender Rohre in einem Segment beträgt in der PHI-Koordinate $0,381^\circ (= 6,65 \text{ mrad})$. Beim Übergang von einem Segment zum anderen ist der Abstand zwischen den am nächsten liegenden Rohren $2,87^\circ (= 50,0 \text{ mrad})$. Die hier angegebenen Werte sind Sollwerte. Eventuelle Abweichungen der wahren Lage der Wendelrohrsegmente von diesen Werten werden durch eine Eichung in der PHI-Koordinate ausgeglichen (vgl. Kap. 4.4). Abb. 25 zeigt die Anordnung der 10 Segmente im Detektor. Jeweils die erste Rohrnummer in jedem Segment ist eingetragen.

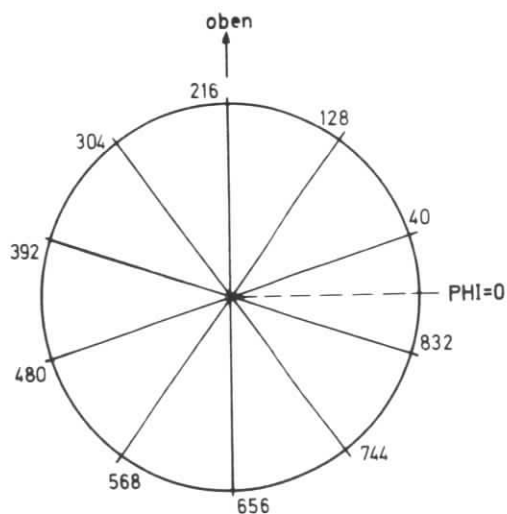


Abb. 25 Anordnung der 10 Wendelrohrsegmente im Detektor PLUTO mit Angabe der jeweils ersten Rohrnummer in jedem Segment

4.3 Die Auslese der Wendelrohrkammer

Alle 880 Wendelrohre in Kammer 15 werden einseitig ausgelesen. Aus finanziellen Gründen wird eine relativ einfache Elektronik verwendet (s. Kap. 3.3), die keine Mehrfachtreffer nachweisen kann. Auf Grund des sehr begrenzten Platzes im Detektor PLUTO werden außerdem die Wendelsignale und die Drahtsignale zu verschiedenen Seiten ausgelesen.

Im folgenden wird untersucht, welche Auswirkungen die Form der Auslese und die verwendete Elektronik auf die von den Wendelrohren gelieferten Daten hat.

4.3.1 Auswirkungen durch Störimpulse

Alle Störimpulse auf der Wendel, unabhängig davon wodurch sie bedingt sind, bewirken im Mittel eine einseitige Verschiebung des gemessenen Teilchenortes zur Ausleseseite der Wendel (+Z-Seite). Das kann man folgendermaßen erklären. Das erste Signal, das nach einem Drahtstart an der Wendelausleseseite erscheint, wird von der Elektronik als Stop erkannt. Erreicht jedoch ein Störimpuls vor einem von einem Teilchen gelieferten Wendelimpuls die Ausleseseite, wird eine zu kleine Laufzeit gemessen. Eine Verschiebung des Teilchenortes zur Ausleseseite wird vorgetäuscht.

Kommen jedoch nach dem vom Teilchen ausgelösten Wendelimpuls noch Störungen, werden sie nicht mehr ausgelesen. Es entsteht in diesem Fall kein Fehler bei der Laufzeitmessung. Die im Mittel einseitige Verschiebung des gemessenen Teilchenortes zur Ausleseseite der Wendel wird in Kap. 4.4 durch die Meßergebnisse mit kosmischer Strahlung bestätigt. Dabei ergibt sich, daß ungefähr 3 % der Treffer durch Störungen einseitig verschoben werden.

4.3.2 Auswirkungen durch Mehrfachtreffer

Insbesondere bei elektromagnetischen Schauern kommt es in der Wendelrohrkammer vor, daß ein Wendelrohr von mehreren Teilchen gleichzeitig getroffen wird. Die für die Wendelrohre verwendete Elektronik ist so aufgebaut, daß sie von den Mehrfachtreffern nur das Teilchen sieht, das der Wendelausleseseite am nächsten ist. Das bedeutet, die Wendelrohrkammer erkennt von einem elektromagnetischen Schauer nur den einen Rand.

Mit Hilfe eines Simulationsprogramms wurde untersucht, was die Wendelrohrkammer bei elektromagnetischen Schauern anzeigt. Das Programm berücksichtigt die Geometrie der Wendelrohrkammer 15 mit allen Einzelheiten, die Z-Auflösung der Wendelrohre und das PLUTO-Magnetfeld.

Das Ergebnis der Rechnung ist in Abb. 26 dargestellt. Der Betrag der Verschiebung der Z-Koordinate des "gemessenen" Schauerschwerpunktes, bedingt durch die einseitige Auslese, ist gegen die Energie des aufschauernenden Teilchens (Elektron) aufgetragen. Die Kurve steigt zuerst mit zunehmender Energie an und erreicht ab 5 GeV Teilchenenergie mit ungefähr 0,8 cm Verschiebung einen konstanten Wert. Die Verschiebung ist kleiner als die statistischen Schwankungen der Schauer. Bei bekannter Energie des aufschauernenden Teilchens kann die Verschiebung korrigiert werden.

Mit dem Simulationsprogramm wurde außerdem die Auflösung des Schauerschwerpunktes in Richtung der PHI-Koordinate berechnet. Sie beträgt umgerechnet auf den Umfang der Wendelrohrkammer bei Energien größer 1 GeV im Mittel $1,1 \text{ cm} \pm 0,4 \text{ cm}$.

Dadurch, daß Wendel und Draht zu verschiedenen Seiten ausgelesen werden, kann ein zusätzlicher Meßfehler auftreten. Gibt es Mehrfachtreffer in einem Rohr, kommt das Startsignal von dem Teilchen, das der Drahtausleseseite am nächsten ist. Das Stoppsignal wird jedoch von dem Teilchen geliefert, das zur Wendelausleseseite den geringsten Abstand hat. Das bedeutet Start- und Stoppsignale für die Zeitmessung kommen von verschiedenen Teilchen. Bedingt durch die zwar sehr kleine, aber endliche Laufzeit auf dem Zähl draht wird eine zu kleine Laufzeitdifferenz gemessen. Eine zusätzliche

Verschiebung der Z-Koordinate des Teilchens, das der Ausleseseite am nächsten ist, ist die Folge. Die Größe des Effektes ist abhängig von der Ausdehnung der Mehrfachtreffer in den Wendelrohren. Aus dem Simulationsprogramm ergibt sich, daß die Ausdehnung elektromagnetischer Schauer in der Wendelrohrebene im wesentlichen nicht größer als 10 cm ist. Die daraus abgeschätzte Verschiebung liegt innerhalb der Auflösung der Elektronik. Der maximal auftretende Fehler läßt sich zu 8 mm abschätzen.

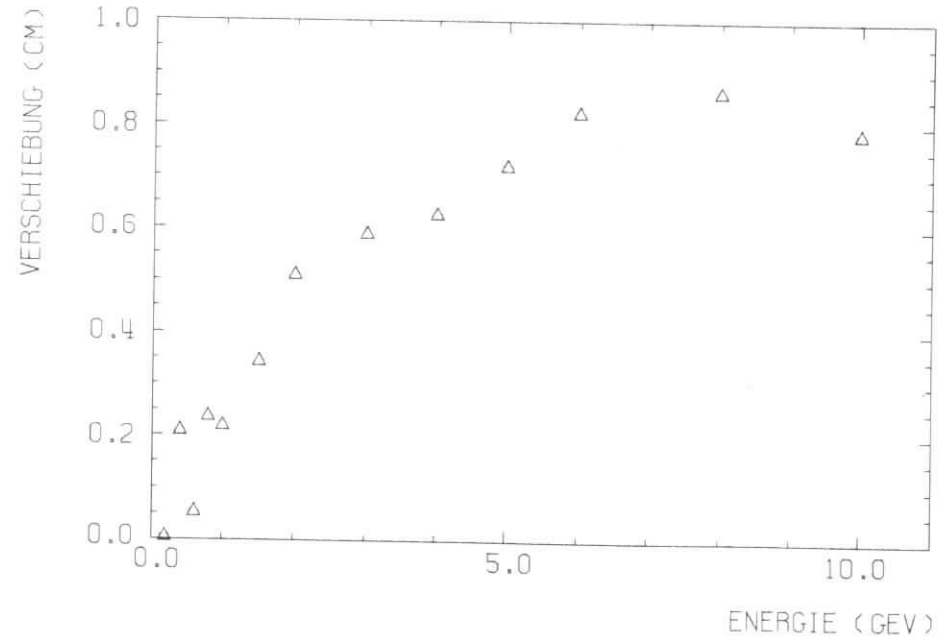


Abb. 26 Betrag der Verschiebung der Z-Koordinate des gemessenen Schauerschwerpunktes bei einseitiger Auslese aufgetragen gegen die Energie des aufschauernenden Teilchens.

4.4 Die Eichung der Wendelrohrkammer mit Hilfe des PLUTO-Innendetektors

Wie im Labor mit der Testkammer (Kap. 3.4.5) festgestellt wurde, ist die Linearität der Wendelrohre sehr gut, die Steigungen der Laufzeitgeraden sind jedoch von Rohr zu Rohr verschieden. Für jedes einzelne Wendelrohr muß deshalb durch Eichung der Verlauf der Laufzeitgeraden bestimmt werden.

Für die Eichung der Wendelrohrkammer (Kammer 15) wurde kosmische Strahlung benutzt. Abb. 27 zeigt zur Veranschaulichung ein Höhenstrahlereignis im Detektor PLUTO. In der Darstellung kann man eine R-PHI Projektion und zwei seitliche Projektionen (X-Z und Y-Z) des Detektors sehen. Die bei den Proportionalkammern angesprochenen Drähte werden in Abb. 27 durch Punkte dargestellt, die Impulshöhen des Schauerzählers durch Ziffern. Ein angesprochenes Wendelrohr ist in den seitlichen Projektionen durch ein "I" bzw. ein "-" hervorgehoben. Die angezeigten Z-Werte der Wendelrohre sind im Beispiel von Abb. 27 noch ohne Eichkorrektur. Wie man in der Abbildung sieht, kann es vorkommen, daß durch ein Teilchen zwei benachbarte Rohre ansprechen. Solche Doppeltreffer in der Wendelrohrkammer kommen oft vor und lassen sich durch die Überlappung der beiden Wendelrohrlagen erklären.

Abb. 28 zeigt die Verteilung der Höhenstrahlereignisse im Detektor 15 über alle 880 Rohre nach einer Meßzeit von ungefähr einer Stunde. Da die Nachweiswahrscheinlichkeit des Detektors PLUTO unabhängig von PHI ist, ist damit die Winkelverteilung der kosmischen Strahlung gemessen worden. Bild 28 zeigt deutlich die \sin^2 PHI-Abhängigkeit der Höhenstrahlen (ALL 75). Die Rohre an den Seiten des Detektors bei Rohrnummer 0 und 440 haben besonders wenig Treffer. Deshalb muß man sehr viele Daten nehmen, um auch für diese Rohre genügend Ereignisse für die Eichung zu erhalten.

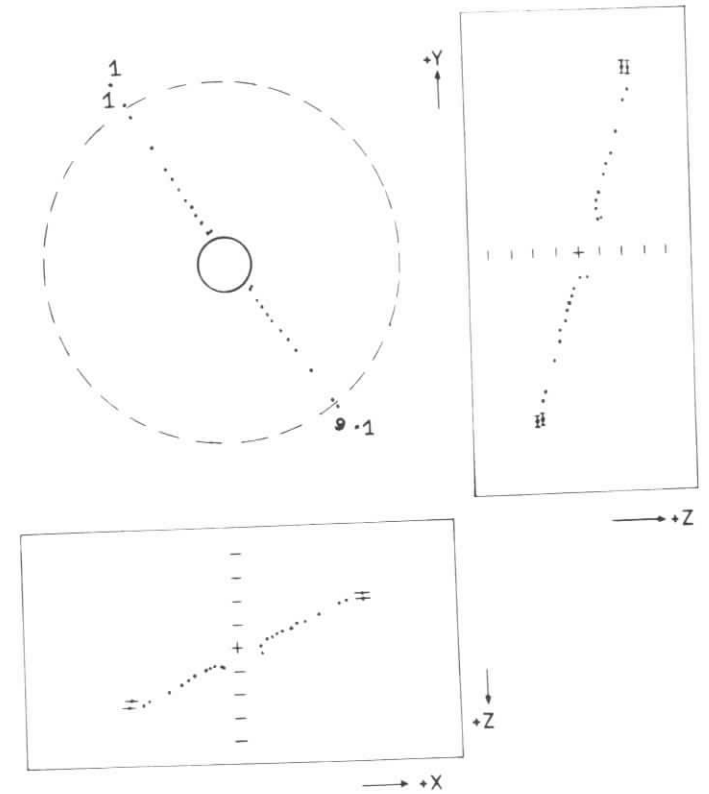


Abb. 27 Höhenstrahlereignis im Detektor PLUTO

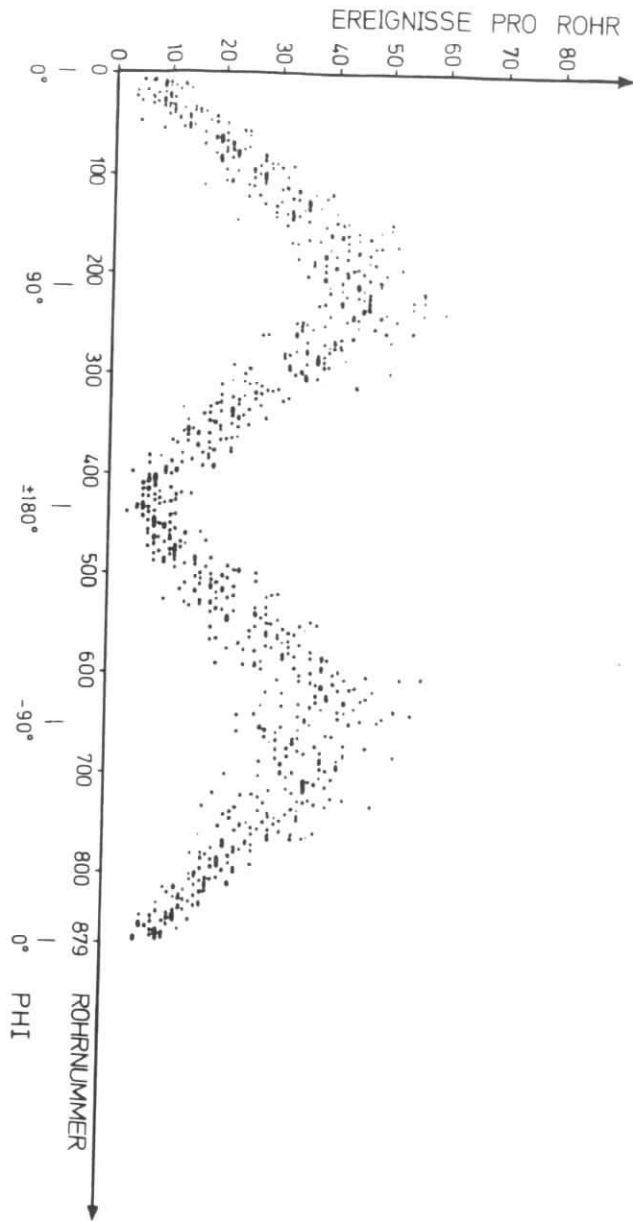


Abb. 28
Verteilung von Höhenstrahlereignissen in der Wendelrohrkammer
nach einer Meßzeit von ungefähr einer Stunde

Für Teilchenspuren aus der kosmischen Strahlung, die das System der 10 inneren Proportionalkammern des Detektors PLUTO erkannte, wurden die Spurparameter bestimmt. Es folgte die Berechnung des Durchstoßpunktes der Spur in der Kammer 15 und der Vergleich mit den Wendelrohrdaten in Z und PHI. Für die Z-Eichung wurde eine lineare Abhängigkeit zwischen Z-Wert aus der Spur und Rohrdaten für jedes Wendelrohr vorausgesetzt. Man erhält damit für jedes Rohr zwei Eichkonstanten, nämlich Steigung und Achsenabschnitt der Laufzeitgeraden. Um Abweichungen der Lage der Wendelrohrsignale von den Sollwerten auszugleichen (vgl. Kap. 4.2), wurde jedem der 10 Segmente aus dem Vergleich mit der Spur in der PHI-Koordinate eine konstante Korrektur zugeordnet.

Für die Eichung wurde im Rahmen dieser Arbeit das Programm HELIX geschrieben, das im folgenden erklärt wird.

4.4.1 Das Programm HELIX

Das Programm HELIX besteht aus zwei Teilen:

- I.: Lesen der gemessenen Kammerdaten und der Spurparameter, PHI-Eichung, Auswahl der Daten für die Z-Eichung
- II.: Sortieren der Daten nach Rohrnummern, lineare Z-Eichung

Abb. 29 zeigt den prinzipiellen Ablauf des Programms. Ausgangspunkt sind die Datenbänder nach der Spurenerkennung durch das PLUTOPAT-Programm. PLUTOPAT ist ein von G. Franke entwickeltes Programm, das aus den Meßpunkten die Teilchenspuren geometrisch rekonstruiert. Es erzeugt die Daten-Bank 'GEOM', die die Spurparameter enthält. Eine Beschreibung des benutzten Bank-Systems findet sich in BLO 77 (BOS).

Das Unterprogramm GOREC liest jeweils die Daten eines Höhenstrahlereignisses vom PLUTOPAT-Datenband. RGEOM übernimmt die Spurparameter aus der Bank 'GEOM' und berechnet den Durchstoßpunkt der Spur in der Wendelrohrkammer. Durch diese "Spurverlängerung" erhält man dort Z- und PHI-Koordinate der Spur: ZS, PHIS.

HELIX: Programm zur Eichung

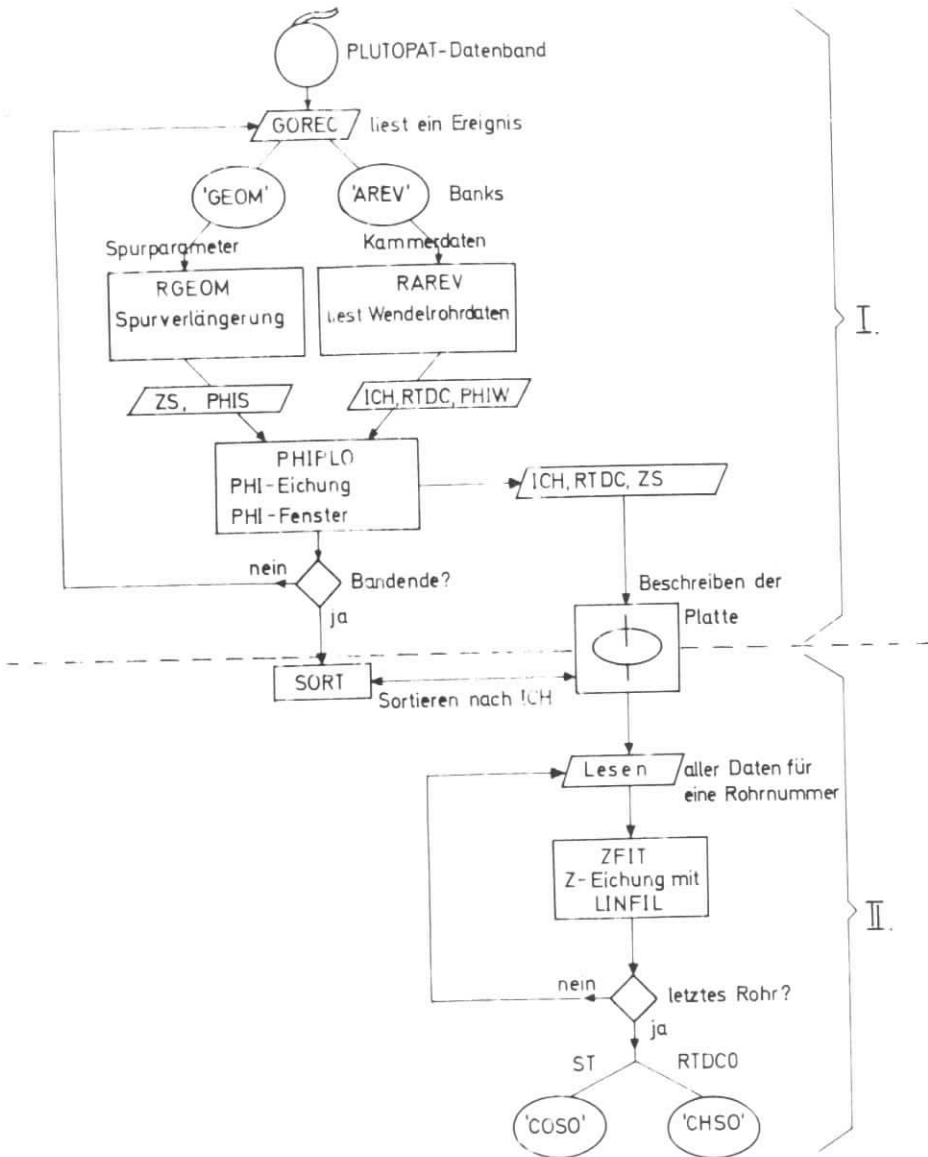


Abb. 29 Prinzipieller Ablauf des Programms HELIX

Die Bank 'AREV' wird aus den Banddaten durch Dekodierung erzeugt. Sie enthält die Meßwerte für jeweils ein Ereignis von allen Detektorelementen von PLUTO. RAREV sucht aus der Bank 'AREV' die Wendelrohrdaten heraus. Dabei werden digitalisierte Zeitinformation (RTDC), Rohrnummer (ICH) und dazugehörige PHI-Koordinate (PHIW) der angesprochenen Rohre herausgeschrieben.

Im Unterprogramm PHIFLO wird die PHI-Eichung vorgenommen, und für die Z-Eichung werden geeignete Spuren herausgesucht. Zur PHI-Eichung wird für jedes Segment der Kammer die Differenz aus dem PHI-Wert der Spur und dem PHI-Wert des angesprochenen Wendelrohrs gebildet: $DPHI = PHIS - PHIW$.

Der Mittelwert aller DPHI-Werte für jedes Segment ergibt die gesuchten PHI-Korrekturen.

Das Heraussuchen geeigneter Spuren für die Z-Eichung geschieht folgendermaßen: Um jede Spur wird symmetrisch ein PHI-Fenster gelegt, mit einer Breite von $11,5^{\circ}$ (= 200 mrad). Das entspricht in der Wendelrohrkammer einer Öffnung von ± 15 Wendelrohren um die Spur. Es wurden für die Z-Eichung nur Spuren herausgesucht, bei denen im PHI-Fenster mindestens ein Wendelrohr, maximal zwei Rohre angesprochen haben. Sind zwei Rohre ausgelöst worden, wird zusätzlich verlangt, daß sie benachbart sind, daß heißt sich überlappen. Durch diese Abfragen werden elektromagnetische Schauer weitgehend ausgeschieden und für die Eichung nicht verwendet. Dadurch ist es möglich, später auch nicht-kosmische Strahlung für die Eichung zu verwenden. Schließlich werden Rohrnummer (ICH), Z-Wert aus der verlängerten Spur (ZS) und digitalisierte Zeitinformation (RTDC) für die geeigneten Spuren auf Platte geschrieben. Die Benutzung der Platte ist wichtig, denn sie ermöglicht die Handhabung der großen Datenmenge.

Von GOREC werden die Ereignisse nacheinander gelesen und wie eben beschrieben bearbeitet. Das geschieht so lange, bis das Band vollständig gelesen ist und alle berechneten Daten auf der Platte gespeichert sind.

Um die Z-Eichung durchzuführen, werden die auf der Platte befindlichen Daten mit einem Sortierprogramm (SORT) nach Rohrnummern sortiert. Für die erste Rohrnummer 0 werden alle Daten in das Programm ZFIT eingelesen. Zunächst wird eine lineare Filterung der Daten durchgeführt, um eventuelle Ausreißer auszusortieren; dann wird nach dem Prinzip der kleinsten Fehlerquadrate eine Gerade durch die Meßwerte gelegt. All dies geschieht mit dem Programm LINFIL (BLO 77).

Abb. 30 zeigt das Ergebnis für ein Rohr. Man sieht deutlich, daß die vorkommenden Ausreißer (Kap. 4.3.1) unterhalb der Laufzeitgeraden bei zu kleinen RTDC-Werten liegen. Das Programm LINFIL erkennt diese Störungen. Es ergibt sich, daß rund 3 % der Treffer in den Wendelrohren solche Ausreißer sind.

Für den Verlauf der Laufzeitgeraden wird die Formel

$$Z = ST (RTDC - RTDC0) \quad (4.1)$$

benutzt. Die lineare Z-Eichung liefert die Steigung ST (mm/Kanal) und den Achsenabschnitt RTDC0 (Kanäle). RTDC0 ist der Kanal, der angezeigt wird, wenn ein geladenes Teilchen bei Z=0 (Mitte des Rohres) ein Wendelrohr durchfliegt.

Ist das erste Rohr auf die beschriebene Art geeicht worden, folgt die Bearbeitung der Daten des nächsten Rohres bis alle 880 Wendelrohre geeicht sind.

Schließlich werden die Eichkonstanten ST und RTDC0 für jede Rohrnummer in zwei Eichbanks 'COS0' und 'CHS0' gespeichert.

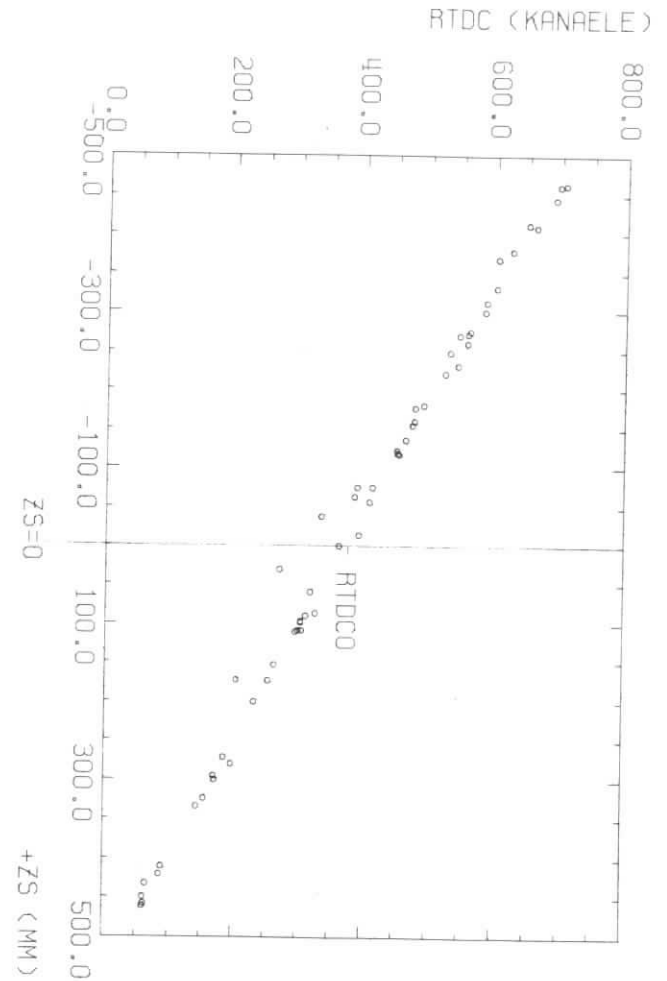


Abb. 30 Digitalisierte Laufzeitdifferenz RTDC gegen Z-Wert ZS aus der Spur für ein Wendelrohr

4.4.2 Ergebnisse der Eichung

Durch die PHI-Eichung erhält jedes Segment eine konstante PHI-Korrektur zugeordnet. Sie beträgt maximal $0,229^{\circ}$ (= 4 mrad); das ist weniger als eine halbe Rohrbreite.

Sind die Rohre nicht parallel zur Zylinderachse ausgerichtet, kann eine Z-abhängige PHI-Eichung nötig sein. Wie genauere Untersuchungen ergaben (BLO 77), ist dies jedoch nicht der Fall. Die Fehler, die man ohne Z-abhängige PHI-Eichung macht, sind nicht signifikant.

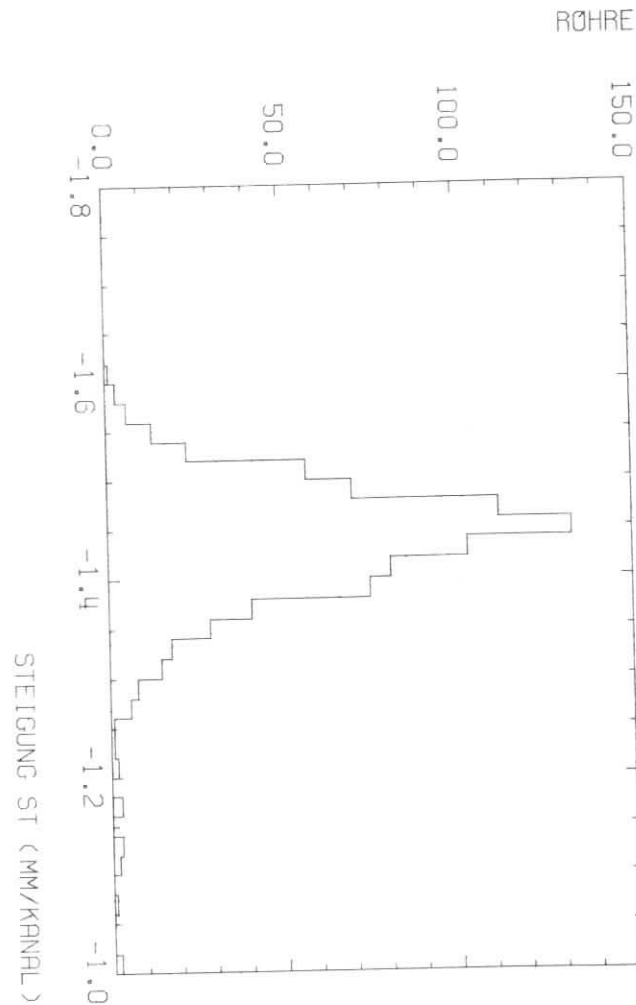
Durch die lineare Z-Eichung wurden jedem Rohr zwei Eichkonstanten ST und RTDCO zugeordnet. Die Abb. 31 und Abb. 32 zeigen die Histogramme dieser Werte für eine Betriebsspannung der Kammer von 1380 V. Es ergibt sich für Mittelwert und Standardabweichung

$$\begin{aligned} \text{RTDCO} &= 370,8 \text{ Kanäle} \pm 11 \text{ Kanäle} \\ \text{ST} &= 1,436 \text{ mm/Kanal} \pm 0,051 \text{ mm/Kanal} \end{aligned}$$

für alle 880 Rohre der Wendelrohrkammer 15.

Die Eichung wurde sowohl bei einem PLUTO-Magnetfeld von 1,7 Tesla als auch bei abgeschaltetem Magneten (Erdfeld) durchgeführt. Eine Abhängigkeit der Eichung vom Magnetfeld konnte dabei nicht beobachtet werden.

Abb. 31 Verteilung der Steigung ST für die Wendelrohre der Kammer 15



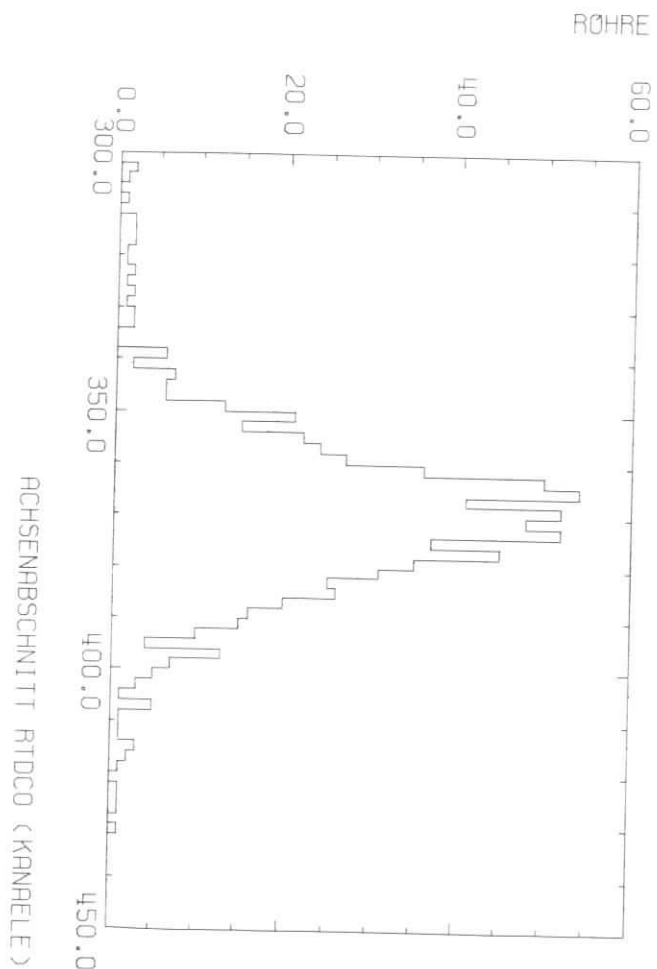


Abb. 32 Verteilung des Achsenabschnitts RTDCO für die Wendelrohre der Kammer 15

4.5 Die Eigenschaften der Wendelrohrkammer

4.5.1 Die Z-Auflösung

Nach der Eichung der Wendelrohrkammer wurde die Auflösung in Z-Richtung mit kosmischer Strahlung bestimmt. Dabei wurde die Tatsache ausgenutzt, daß sich die Wendelrohre in den beiden Lagen gegenseitig überlappen. Die dadurch auftretenden Doppeltreffer (s. Abb. 27, Kap. 4.4) eigneten sich sehr gut zur Bestimmung der Z-Auflösung der Wendelrohrkammer. Es wurden nur solche Ereignisse herausgesucht, bei denen durch ein kosmisches Teilchen zwei benachbarte Rohre angesprochen hatten. Aus der Differenz der von den beiden Wendelrohren angezeigten Z-Werte erhielt man die Z-Auflösung. Dabei wurde auf schräg durch die Kammer gegangene Spuren korrigiert. Bei diesem Verfahren zur Bestimmung der Z-Auflösung haben Fehler in der "Spurverlängerung" nur wenig Einfluß auf das Ergebnis. Das wird im nächsten Abschnitt näher erläutert. Die Berechnung der Z-Auflösung erfolgte mit dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Programm AUFLOES, das im folgenden beschrieben wird.

4.5.1.1 Das Programm AUFLOES

Das Programm AUFLOES ähnelt dem Teil I des Eichprogramms HELIX. Abb. 33 zeigt einen prinzipiellen Ablaufplan des Programms AUFLOES. Ausgangspunkt ist wieder das PLUTOPAT-Datenband. Das Unterprogramm GOREC liest ein Ereignis. RGEOM übernimmt die Spurparameter und "verlängert" die Spur in die beiden Wendelrohrlagen bei den Zylinderradien R1 und R2. Abb. 34 zeigt schematisch einen Schnitt durch die beiden Wendelrohrlagen mit schrägem Teilchendurchgang.

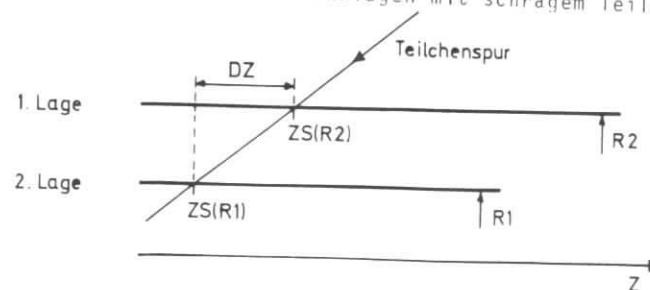


Abb. 34 Schnitt durch beide Wendelrohrlagen mit schrägem Teilchendurchgang

AUFLOES: Programm zur Z-Auflösung

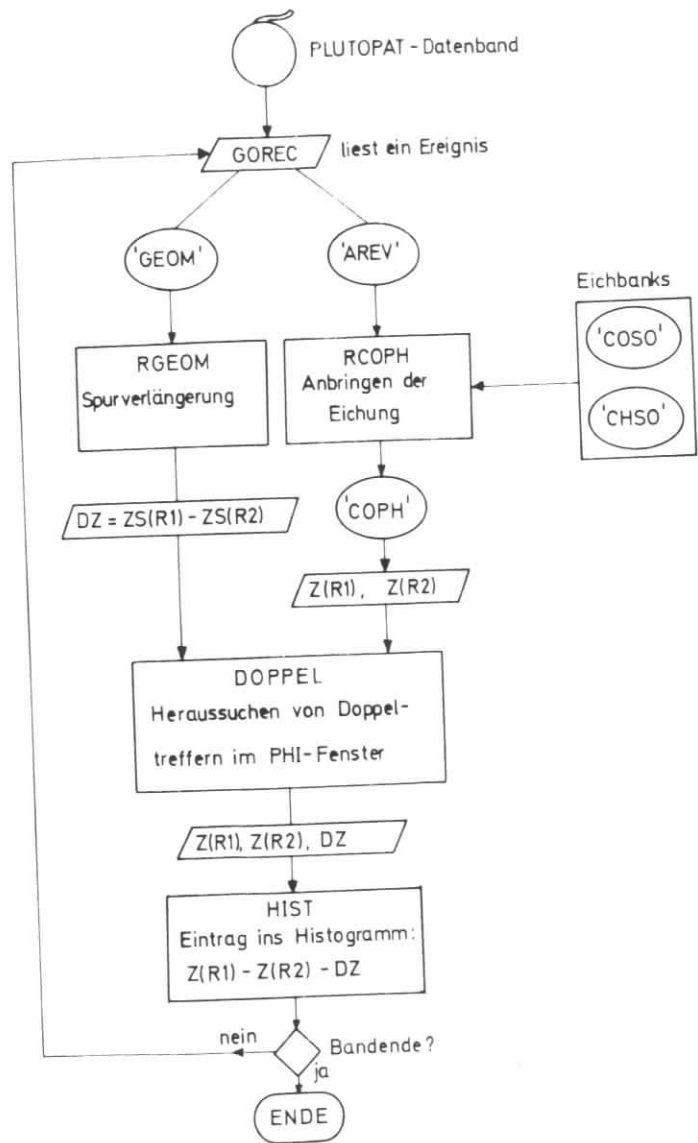


Abb. 33 Prinzipieller Ablauf des Programms AUFLOES

Die Differenz $DZ = ZS(R1) - ZS(R2)$ der beiden aus der Spurverlängerung erhaltenen ZS-Werte wird gebildet. In Abb. 35 ist die DZ-Verteilung für die Wendelrohrkammer dargestellt. Die Halbwertsbreite beträgt 6,0 mm. Da die beiden Rohrlagen einen Abstand von 7 mm haben, bedeutet das, Teilchenspuren mit kleiner Neigung gegen die Z-Richtung kommen nur selten vor.

Die Bank 'AREV' wird aus den Banddaten durch Dekodierung erzeugt. RCOPH liest die Kammerdaten aus 'AREV' und bringt die Z-Eichung nach der Formel (4.1) an den Wendelrohrdaten an. Dazu werden die bei der Eichung erzeugten Banks 'COS0' und 'CHSO' gelesen. Ergebnis ist schließlich die Bank 'COPH', die die Kammerdaten Z(R1) und Z(R2) nach der Korrektur durch die Eichbanks enthält. Z(R1) bezieht sich dabei auf die erste, Z(R2) auf die zweite Wendelrohrlage.

Im Unterprogramm DOPPEL werden Doppeltreffer herausgesucht. Das geschieht folgendermaßen. Um die Teilchenspur wird ein PHI-Fenster von $\pm 5,7^\circ$ ($= \pm 100$ mrad) gelegt. Dann wird abgefragt, ob in dem PHI-Fenster nur genau zwei benachbarte Rohre angesprochen haben. Ist dies der Fall, trägt das Programm HIST den Wert $Z(R1) - Z(R2) - DZ$ in ein Histogramm ein. Das ist die auf schrägen Teilchendurchgang korrigierte Differenz der gemessenen Z-Werte der beiden angesprochenen Rohre. Abb. 36 zeigt das Histogramm zur Z-Auflösung. Da die DZ-Verteilung (Abb. 35) wesentlich schmäler ist, haben eventuelle Fehler in der "Spurverlängerung" nur geringen Einfluß auf die Bestimmung der Z-Auflösung.

Schließlich wird abgefragt, ob das PLUTOPAT-Band zu Ende ist. Ist das nicht der Fall, liest GOREC das nächste Ereignis, andernfalls ist das Programm AUFLOES beendet.

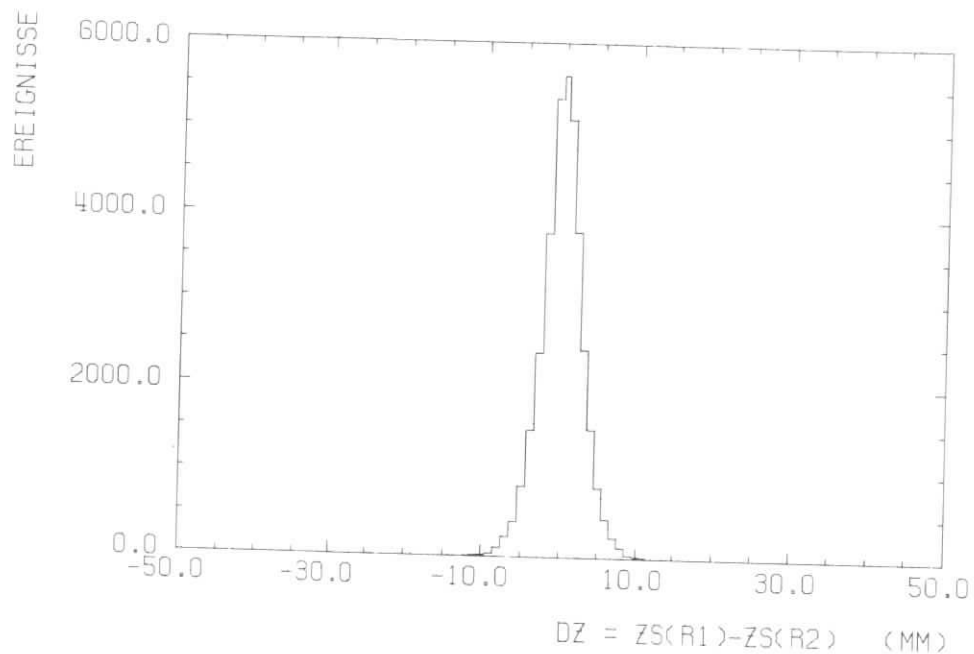


Abb. 35 Differenz der aus der Spur berechneten ZS-Werte in den beiden Wendelrohrlagen

4.5.1.2 Ergebnis der Messungen

Das in Abb. 36 gezeigte Histogramm zur Z-Auflösung der Wendelrohrkammer enthält die Daten aller 880 Rohre der Kammer 15. Die Halbwertsbreite der gemessenen Verteilung ist 13,0 mm. Da sich dieser Wert aus der Auflösung jeweils zweier Wendelrohre zusammensetzt, muß er noch durch $\sqrt{2}$ dividiert werden, um die Auflösung für ein Rohr zu erhalten. Bei Annahme einer Gaußverteilung erhält man schließlich eine Z-Auflösung von $\sigma = 3,9$ mm für die gesamte Wendelrohrkammer mit 880 Rohren. Dieser Wert setzt sich aus der Nichtlinearität σ_1 der Rohre und der Elektronik und der eigentlichen Ortsauflösung σ_p der Rohre zusammen.

Legt man die mit der Testkammer gemessene Nichtlinearität zugrunde, so ergibt sich über die gesamte Wendelrohrkammer eine Ortsauflösung $\sigma_p = 3,3$ mm. Das ist in guter Übereinstimmung mit dem Wert, der für ein einzelnes Rohr mit der radioaktiven Quelle gemessen wurde (vgl. Kap. 3.4.4).

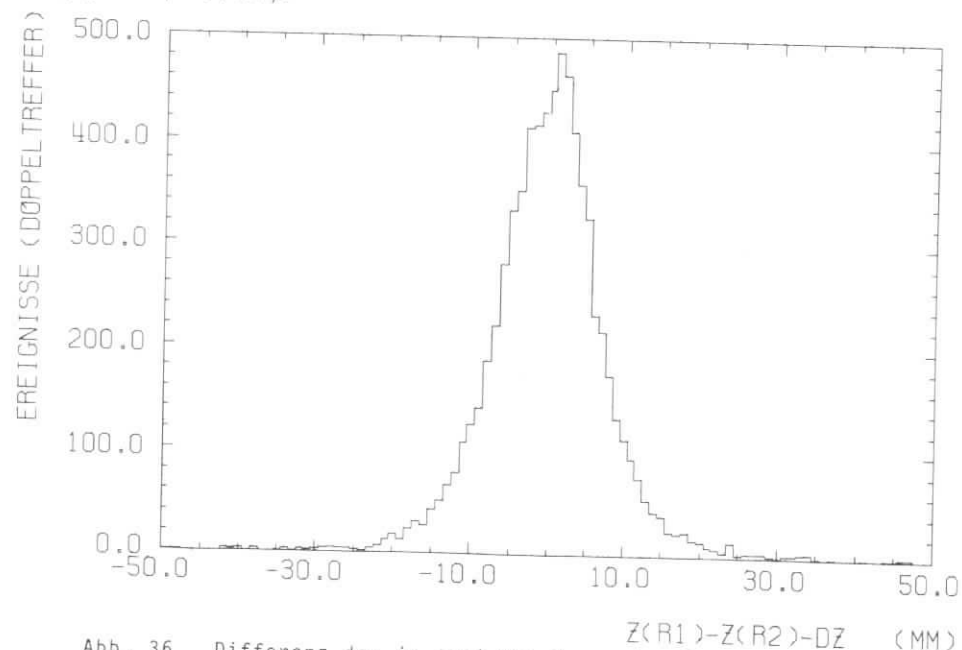


Abb. 36 Differenz der in zwei überlappenden Rohren gemessenen Z-Werte korrigiert für schräge Spuren

4.5.2 Die Ermittlung des günstigsten Arbeitspunktes

Der Arbeitspunkt U_A der Wendelrohre liegt im Bereich der Anodenspannung, bei dem die Nachweiswahrscheinlichkeit ein Plateau erreicht hat und noch keine Geigerimpulse einsetzen. Außerdem muß die Abhängigkeit der Laufzeitdifferenz von der Betriebsspannung möglichst gering sein (vgl. Kap. 3.4.6).

Die den Arbeitspunkt bestimmenden Hochspannungskurven für Proportionalkammern hängen im allgemeinen von dem benutzten Gas ab. Im folgenden wird kurz dargestellt, worauf man bei der Auswahl des Gasgemisches achten muß.

4.5.2.1 Das "PLUTO-Gas"

Bei längerem Betrieb von Proportionalkammern mit großen Zählraten kann es zur Verschmutzung der Kammern durch Ablagerung polymerisierender Gasbestandteile an den Elektroden kommen. Der Malter-Effekt *) (MAL 36) führt schließlich zur Zerstörung der Kammern. Durch die Zugabe kleiner Mengen nichtpolymerisierender Stoffe mit einem Ionisationspotential, das unter dem der anderen Gasanteile liegt, ist es möglich, die Verschmutzung zu verhindern. Nachdem ein Ladungsaustausch stattgefunden hat, erreichen nämlich nur Ionen von der Stoff mit dem kleinsten Ionisationspotential im Gas die Elektroden der Kammer. Können diese Ionen nicht polymerisieren, kommt es auch zu keiner Verschmutzung der Kammern (SAU 77).

*) Malter-Effekt: Aufbau hoher elektrischer Felder an den isolierenden Schichten, die sich auf den Elektroden abgelagert haben; die Felder entstehen durch Ionen, die nur noch durch Diffusion die Elektroden erreichen können; bei Zählraten zwischen 10^2 und $10^3 \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ kommt es zu einem Durchschlagen mit Sekundärelektronenemission, und eine darauffolgende permanente Entladung zerstört die Kammer.

Stoffe mit den beschriebenen Eigenschaften, die oft in Proportionalkammern verwendet werden, sind zum Beispiel Propanol-(1) ($\text{CH}_3\text{H}_7\text{OH}$) und Formaldehyddimethylacetal ($(\text{OCH}_3)_2\text{CH}_2$). Letzteres, auch kurz Methylal genannt, wird für die Proportionalkammern des Detektors PLUTO benutzt. Tab. 3 zeigt die Zusammensetzung des eingesetzten Gases. Die Ionisationspotentiale der einzelnen Komponenten sind mit angegeben. Das Gasgemisch hat eine etwas andere Zusammensetzung als das bei der Testkammer verwendete, da bei den Testmessungen kein Methylal zur Verfügung stand. Der Anteil von 10 % Kohlenwasserstoffen ist jedoch der gleiche. Die Testmessungen sollten sich deshalb in erster Näherung übertragen lassen.

Es ist aber bekannt, daß selbst kleine Änderungen in der Gaszusammensetzung bei Proportionalkammern Verschiebungen der Plateaukurven (z.B. der Nachweiswahrscheinlichkeit) nach sich ziehen können. Deshalb müssen die mit der Testkammer bestimmten Hochspannungskurven (Kap. 3.4) im Detektor PLUTO überprüft werden, um den genauen Arbeitspunkt der Wendelrohrkammern zu ermitteln.

Tab. 3
Zusammensetzung des "PLUTO-Gases"

Gas	chem. Formel	Anteil (%)	Ionisationspotential (eV)
Argon	Ar	90	15,7
Propan	$\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_3$	8,5	11,1
Methylal	$(\text{OCH}_3)_2\text{CH}_2$	1,5	9,7

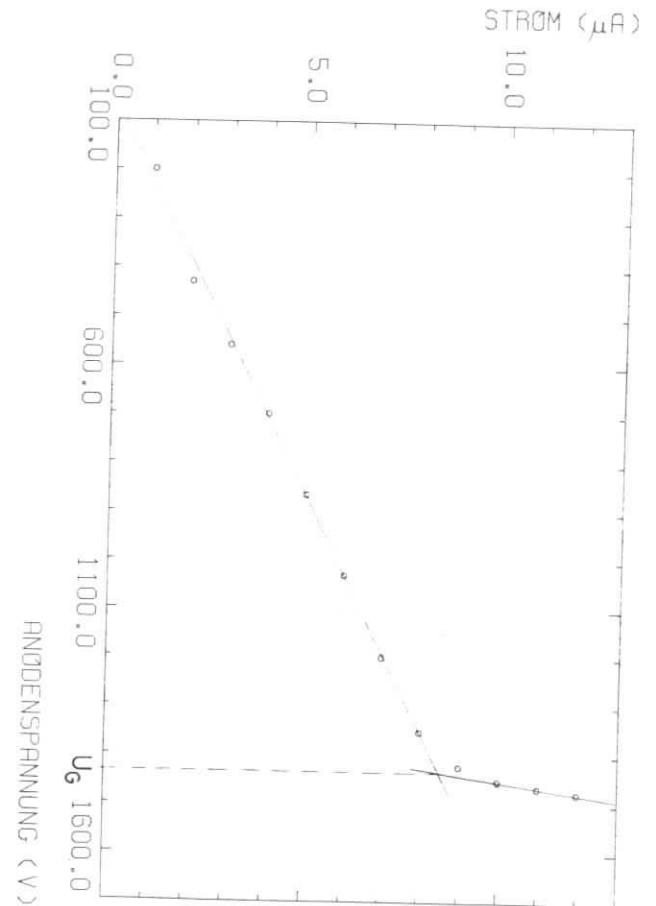
4.5.2.2 Bestimmung des Geigerbereichs

Proportionalkammern müssen unterhalb des Geigerbereichs betrieben werden, da andernfalls im Dauerbetrieb die Zähldrähte durch Geigerimpulse zerstört werden können. Deshalb ist es sehr wichtig, den Einsatz des Geigerbereichs genau zu bestimmen.

Den Beginn des Geigerbereichs erhielt man durch Messung des Kammerstroms in Abhängigkeit von der Anodenspannung. Abb. 37 zeigt das Meßergebnis bei Verwendung kosmischer Strahlung und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 %. Der aufgetragene Strom ist die Summe der Einzelströme aller 880 Wendelrohre der Kammer 15. Die Angabe der relativen Luftfeuchtigkeit ist wichtig, da der Kammerstrom im allgemeinen stark von ihr abhängt (ZIM 77).

Aus Abb. 37 geht hervor, daß mit wachsender Anodenspannung der Strom zunächst langsam, von einer bestimmten Grenzspannung U_G jedoch sehr stark ansteigt. Der steile Anstieg wird durch den Einsatz von Geigerimpulsen hervorgerufen. Der Beginn des Geigerbereichs wurde aus der gemessenen Kurve graphisch zu $U_G=1430$ V ermittelt. Dieser Wert liegt nur wenig über dem bei der Testkammer erhaltenen Punkt von 1410 V.

Abb. 37 Abhängigkeit des Kammerstromes von der Anodenspannung



4.5.2.3 Die Nachweiswahrscheinlichkeit

Die Nachweiswahrscheinlichkeit der Wendelrohrkammer (Kammer 15) wurde im Detektor PLUTO relativ zur nächsten inneren Proportionalkammer (Kammer 14) aus dem Verhältnis der Zählraten der beiden Kammern bestimmt.

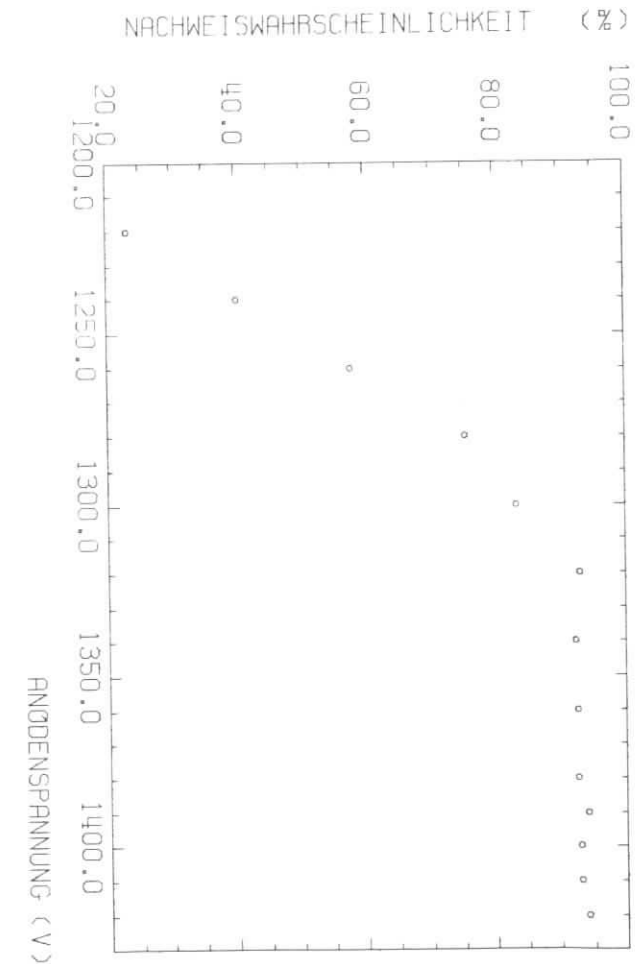
Abb. 38 zeigt das Ergebnis gemessen mit kosmischer Strahlung. Die Nachweiswahrscheinlichkeit erreicht bei 1320 V Anodenspannung ein Plateau mit Werten zwischen 92% und 94%. Dabei ist zu beachten, daß die Nachweiswahrscheinlichkeit der gesamten Kammer aus geometrischen Gründen maximal 94,5% betragen kann (Kap. 4.2). Umgerechnet auf die Gebiete zwischen den Stegen beträgt die Nachweiswahrscheinlichkeit im Mittel 98,5%. Das Ergebnis ist deshalb in guter Übereinstimmung mit der bei der Testkammer gemessenen Plateaukurve (Kap. 3.4.3).

4.5.2.4 Die Abhängigkeit der gemessenen Laufzeitdifferenz von der Anodenspannung

Mit dem Testaufbau wurde für die Testkammer eine Abhängigkeit der gemessenen Laufzeitdifferenz von der Anodenspannung bei konstantem z-Wert bestimmt (vgl. Kap. 3.4.6).

Um diese Abhängigkeit für die Wendelrohrkammer 15 zu messen, wurden für verschiedene Anodenspannungswerte jeweils Daten mit 10 000 kosmischen Ereignissen ausgewertet. Mit Hilfe des Programms HELIX (Kap. 4.4.1) erfolgte für jeden Spannungswert die Bestimmung der Laufzeitgeraden für die einzelnen Wendelrohre der Kammer 15. Aus den dabei erhaltenen Achsenabschnitten (RTDCO) der verschiedenen Rohre wurde der Mittelwert berechnet. Dieses mittlere RTDCO entspricht der mittleren digitalisierten Laufzeit, die man erhält, wenn ein geladenes Teilchen durch die Mitte der Wendelrohrkammer (bei $Z=0$) fliegt. In Abb. 39 ist das Ergebnis der Messungen dargestellt. Das mittlere RTDCO ist gegen die Anodenspannung aufgetragen. Der gemessene Verlauf ist in guter Übereinstimmung mit demjenigen, der im Testaufbau bestimmt wurde (Kap. 3.4.6, Abb. 18). Zunächst steigt die Kurve steil an bis zu einer Anodenspannung von ungefähr $U_T=1340$ V. Danach flacht sie ab und hat nur noch eine Steigung von etwa 5 Kanälen/100 V.

Abb. 38 Nachweiswahrscheinlichkeit der Wendelrohrkammer in Abhängigkeit von der Anodenspannung, gemessen mit kosmischer Strahlung



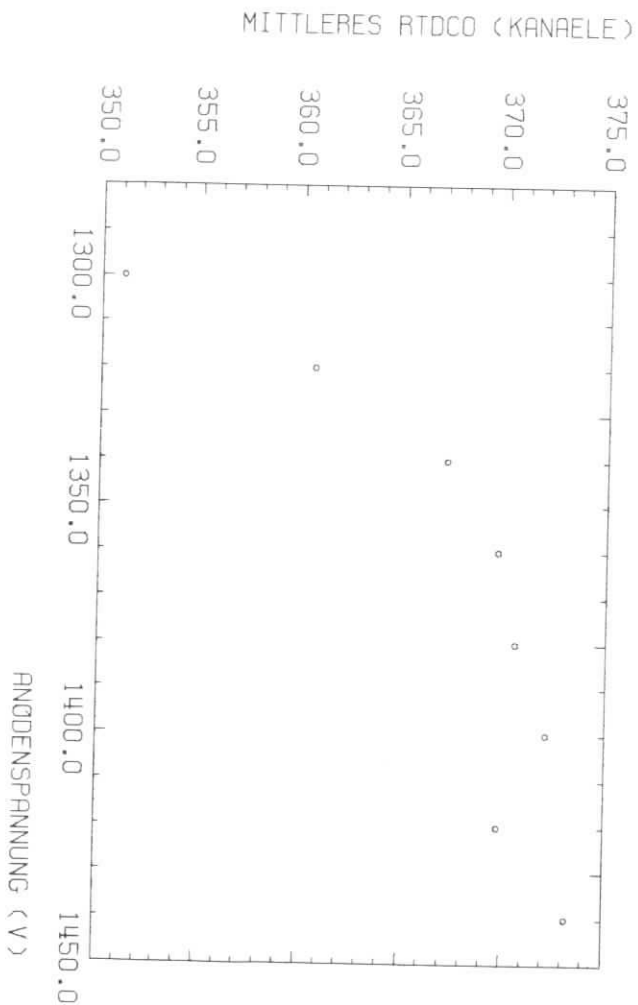


Abb. 39
Abhängigkeit der Laufzeit der Wendelrohre der
Kammer 15 von der Anodenspannung

4.5.2.5 Ergebnis der Messungen

Die bei der Wendelrohrkammer mit dem im Detektor PLUTO verwendeten Gas gemessenen Hochspannungskurven stimmen recht gut mit den im Testaufbau erhaltenen Ergebnissen (Kap. 3.4) überein. Der Zusatz von Methylal im Gas hat nur zu kleinen Plateauverschiebungen geführt.

Der günstigste Arbeitspunkt U_A der Wendelrohrkammer wird aus den ermittelten Spannungswerten U_G und U_T mit der Beziehung (3.29) (S. 46) berechnet. Man erhält damit einen Wert von 1385 V für den günstigsten Arbeitspunkt der Wendelrohrkammer.

5. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden der Aufbau und die Inbetriebnahme einer neuartigen Proportionalkammer für den Schauerzähler des magnetischen Detektors PLUTO beschrieben. Die Kammer besteht aus einem großflächigen zylindrischen System von 880 Wendelrohren und dient zur unabhängigen Messung des Schauerortes in den zwei Koordinaten der Zylinderfläche. Wendelrohre sind spezielle Proportionalrohre, bei denen die Kathode als wendelförmige Verzögerungsleitung ausgebildet ist. Die Laufzeitdifferenz zwischen schnellem Zählrohrimpuls und durch die Wendel verzögertem Kathodenimpuls wird am Rohrende gemessen. Dadurch ist eine eindeutige Bestimmung der Ortskoordinate geladener Teilchen in Zählrohrtrichtung (z-Koordinate) möglich.

Die Eigenschaften einzelner Wendelrohre wurden mit einer radioaktiven β -Quelle untersucht. Dabei ergab sich für die Auflösung in Richtung der z-Koordinate ein Wert von $\sigma_z = 3,6$ mm, der sich nur geringfügig über die Rohrlänge ändert. Die Wendelrohre und die dazugehörige Ausleseelektronik wurden geprüft in wie weit die Abhängigkeit der gemessenen Laufzeitdifferenz von der z-Koordinate linear ist. Durch Messung mit der radioaktiven Quelle erhielt man eine mittlere Abweichung von $\sigma_z = 2,0$ mm vom linearen Verlauf.

Mit einem Gasgemisch von 90 % Argon und 10% Propan beträgt die Plateaulänge für den Proportionalbereich 100 V.

Der Test der Wendelrohrkammer im Detektor PLUTO erfolgte mit kosmischer Strahlung. Mit Hilfe des Innendetektors wurde eine lineare z-Eichung für jedes der 880 Rohre durchgeführt. Für die z-Auflösung kosmischer Einzelspuren ergab sich ein Wert von $\sigma_z = 3,9$ mm gemittelt über die gesamte Kammer.

Literaturverzeichnis

- ALL 75 O. C. Allkover, Introduction to Cosmic Radiation, Verlag Karl Thiemeig 1975
- BLF 47 J. P. Blewett und J. H. Rubel, Video delay lines Proc. IRE-Waves and Electrons Section, 35 (1947)
- BLO 77 V. Blobel, Bank Organisation System (BOS), Interner Bericht DESY F 14-77/01
- BLO 77 V. Blobel, LINFIL, persönliche Mitteilung
- DEK 75 K. Derikum, Die Hochspannungsauslese einer zylindrischen Proportionalkammer, Interner Bericht DESY F 33-75/2, Diplomarbeit 1975
- GRO 72 R. Grove, I. Ko, B. Leskovar und V. Perez-Mendez, Nucl. Instrum. Methods 99 (1972) 179
- JEN 77 H. Jensing, Test eines Schauerzählerringes für den magnetischen Detektor PLUTO, Diplomarbeit, Hamburg 1977
- KAL 46 H. E. Kallmann, Equalized Delay Lines, Proc. IRE 34 (1946)
- LAN 61 Landolt Börnstein, Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaft und Technik, neue Serie, Gruppe I: Kernphysik und Kerntechnik Bd. 1, Energie-Niveaus der Kerne 1961
- LEE 72 D. M. Lee, J. E. Sobottka und H. A. Thiessen, Los Alamos Report LA 4968-MS (1972)
- MAL 36 L. Malter, Phys. Rev. 50, 48 (1936)
- MAR 77 A. Marxen, persönliche Mitteilung 1977
- MEI 56 Meinke-Gundlach, Taschenbuch der Hochfrequenztechnik, Springer Verlag 1956
- PLU 74 PLUTO-Handbuch, DESY 1974
- STU 70 H. J. Stuckenberg, CAMAC, Interner Bericht DESY F 56-70/7, Hamburg 1970
- SAU 77 F. Sauli, Principles of Operation of Multiwire Proportional and Drift Chambers, CERN 77-09, 1977

- SCH 77 H. Schultz, persönliche Mitteilung 1977
VAL 65 VALVO Entwicklungsmitteilungen 10,
Verzögerungsleitungen für das "Y"-Signal in
Farbfernsehern, 1965
ZIM 76 W. Zimmermann, Die Wendelrohrkammer,
unveröffentlicht, 1976
ZIM 77 W. Zimmermann, persönliche Mitteilung, 1977
ZUR 65 R. Zurmühl, Praktische Mathematik für
Ingenieure und Physiker, Springer Verlag 1965

Liste der Abbildungen

- Abb. 1 Aufbau eines Wendelrohres
Abb. 2 Arbeitsprinzip eines Wendelrohres
Abb. 3 Vereinfachtes Ersatzschaltbild einer elektro-
magnetischen Verzögerungsleitung
Abb. 4 Schematischer Längsschnitt des Wendelrohres
Abb. 5 Längsschnitt durch die beiden coaxialen
Zylinderspulen
Abb. 6 Anordnung der beiden Spulen
Abb. 7 Wickeln der Wendel
Abb. 8 Das Wendelrohr
Abb. 9 Prinzipschaltbild des Hauptverstärkers
Abb. 10 Schematische Darstellung des zeitlichen Verlaufs
der Ausgangsspannungen $u_1(t)$ und $u_2(t)$ der beiden
Integratoren
Abb. 11 Querschnitt durch die Testkammer
Abb. 12 Prinzipschaltbild des benutzten Testaufbaus
Abb. 13 Impulsformen von Zähldraht und Wendel bei einer
Anodenspannung von 1380 V gemessen mit einer
radioaktiven ^{106}Ru - β -Quelle
Abb. 14 Abhängigkeit der mittleren Impulshöhe der
Zähldrahtsignale von der Anodenspannung
Abb. 15 Nachweiswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit
von der Anodenspannung
Abb. 16 Ortsauflösung der Wendelrohre, gemessen mit
der ^{106}Ru -Quelle
Abb. 17 Die Linearitätskurve für ein typisches Wendelrohr
Abb. 18 Abhängigkeit der gemessenen Laufzeitdifferenz
von der Anodenspannung, ^{106}Ru -Quelle bei $z = 90$ cm
Abb. 19 Querschnitt durch den Detektor PLUTO
Abb. 20 Querschnitt durch einen Teil des Schauerzählers
mit der Wendelrohrkammer

- Abb. 21 Längsschnitt durch den Detektor und Definition der Z-Koordinate
- Abb. 22 Querschnitt durch den Detektor und Definition der R-, PHI-, X- und Y-Koordinate
- Abb. 23 Einbau eines Wendelrohrsegments in den Schauerzähler
- Abb. 24 Rand eines Wendelrohrsegments im Querschnitt
- Abb. 25 Anordnung der 10 Wendelrohrsegmente im Detektor PLUTO mit Angabe der jeweils ersten Rohrnummer in jedem Segment
- Abb. 26 Betrag der Verschiebung der Z-Koordinate des gemessenen Schauerschwerpunktes bei einseitiger Auslese aufgetragen gegen die Energie des aufschauernenden Teilchens
- Abb. 27 Höhenstrahlereignis im Detektor PLUTO
- Abb. 28 Verteilung von Höhenstrahlereignissen in der Wendelrohrkammer nach einer Meßzeit von ungefähr einer Stunde
- Abb. 29 Prinzipieller Ablauf des Programms HELIX
- Abb. 30 Digitalisierte Laufzeitdifferenz RTDC gegen Z-Wert ZS aus der Spur für ein Wendelrohr
- Abb. 31 Verteilung der Steigung ST für die Wendelrohre der Kammer 15
- Abb. 32 Verteilung des Achsenabschnitts RTDCO für die Wendelrohre der Kammer 15
- Abb. 33 Prinzipieller Ablauf des Programms AUFLOES
- Abb. 34 Schnitt durch beide Wendelrohrlagen mit schrägem Teilchendurchgang
- Abb. 35 Differenz der aus der Spur berechneten ZS-Werte in den beiden Wendelrohrlagen
- Abb. 36 Differenz der in zwei überlappenden Rohren gemessenen Z-Werte korrigiert für schräge Spuren
- Abb. 37 Abhängigkeit des Kammerstromes von der Anodenspannung
- Abb. 38 Nachweiswahrscheinlichkeit der Wendelrohrkammer in Abhängigkeit von der Anodenspannung, gemessen mit kosmischer Strahlung
- Abb. 39 Abhängigkeit der Laufzeit der Wendelrohre der Kammer 15 von der Anodenspannung

Liste der Tabellen

- Tabelle 1 Geometrische und elektrische Parameter für Wendelrohr Typ A, verwendet im Schauerzähler des Detektors PLUTO
- Tabelle 2 Geometrische und elektrische Parameter für Wendelrohr Typ B, verwendet in der innersten Proportionalkammer des Detektors PLUTO
- Tabelle 3 Zusammensetzung des "PLUTO-Gases"

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des Experiments der PLUTO-Kollaboration. Allen Mitgliedern der Kollaboration gilt mein Dank für die nette und kameradschaftliche Arbeitsatmosphäre.

Herrn Prof. Dr. H. Spitzer danke ich für die Themenstellung und die Unterstützung bei allen auftretenden Problemen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. G. Flügge und Herrn R. Koppitz für die Betreuung der Arbeit und zahlreiche Diskussionen und Hinweise.

Insbesondere Herrn Dr. M. Rößler, Herrn R. Pforte und Herrn W. Zimmermann danke ich für die vielen nützlichen Hinweise und Diskussionen und die Hilfe an der Meßapparatur.

Für die Unterstützung bei der Auswertung der Messungen danke ich den Herren Prof. V. Blobel, Prof. Dr. A. F. Garfinkel und W. Lührsen.

Den Herren K. Finke, A. Marxen, H. Schultz und A. Stüben gilt mein Dank für die Hilfe bei allen technischen Problemen.

Für die vielen Diskussionen über physikalische Fragen danke ich Herrn L. Boesten und Herrn Dr. K. Wacker.

Frau Espe danke ich für die sorgfältige Anfertigung der Reinschrift.