Fakultät für Physik und Astronomie

Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg

Diplomarbeit

im Studiengang Physik

vorgelegt von

**Jens Kessler**

aus Dillingen/Saar

Juli 2001

# Entwicklung von Straw-Detektoren für den Einsatz im Experiment LHC-b

Die Diplomarbeit wurde von Jens Kessler ausgeführt am
Physikalischen Institut
unter der Betreuung von
Herrn Prof. Dr. Franz Eisele

# Abstract

*Entwicklung von Strawdetektoren für den Einsatz im Experiment LHC-b*

Das äußere Spurkammersystem des LHC-b Experimentes wird auf der Strawtechnologie basierend aufgebaut. Es besteht aus neun Stationen mit jeweils acht Lagen von Straws. Zwei Lagen werden in einzelnen Modulen zusammengefaßt. Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden verschiedene Konzepte zum Bau einzelner Strawmodule untersucht und gebaut. Anhand mehrerer Testmodule wurden Eigenschaften der Straws wie das Plateau der Gasverstärkung, Einfluß der Drahtpositionierung und Crosstalk gemessen.
Außerdem wurde die Röntgenanlage des Physikalischen Instituts auf Alterungsmessungen vorbereitet und an einem Testmodul durchgeführt.

*Development and studies on straw detectors for use in the experiment LHC-b*

The Outer Tracking system of the LHC-b will be build using strawtube detectors. It consists of nine stations with eight layers of straws each. Two layers together are built using independent modules. In this thesis, several concepts of modules were built and studied. Using several test modules, properties of straws like the gas gain plateau, the influence of wire holders and crosstalk were measured. Also, the X-ray source at the Institute was prepared for ageing measurements. One such measurement was performed using a preliminary module.

# Inhaltsverzeichnis

# Kapitel 1

# Einleitung

## 1.1 CP-Verletzung und B-Physik

Lange Zeit wurde als gegeben hingenommen, daß die Naturgesetze invariant unter diskreten Symmetrieoperationen wie Parität P, Ladungskonjugation C und Zeitumkehr T sind. 1960 wurde allerdings in Zerfällen der schwachen Wechselwirkung die maximale Verletzung von P und C entdeckt. So sind alle Neutrinos linkshändig, während alle Antineutrinos rechtshändig sind. Wenn nun die Paritätsoperation auf ein linkshändiges Neutrino angwendet wird, erhält man ein rechtshändiges Neutrino, was nicht existiert. Wenn die Parität erhalten wäre, müßten rechts- und linkshändige Neutrinos gleichoft vorkommen. Ebenso ist es mit der Ladungskonjugation, was in unten folgender Tabelle erläutert ist.

Die eingeklammerten Teilchen existieren wie oben gesagt nicht, die Anwendung von C und P auf ein linkshändiges Neutrino führt jedoch wiederum zu einem rechtshändigen Antineutrino und umgekehrt. Daher schien die CP-Operation eine Erhaltungsgröße zu sein. Allerdings wurden bald im System der neutralen Kaonen Anzeichen für eine Verletzung der CP-Erhaltung entdeckt. Die in Kollisionen durch die starke Wechselwirkung erzeugten neutralen Kaonen sind Zustände mit einer definierten Strangeness:

$$K^0 = |\bar{s}d> \tag{1.1}$$
$$\overline{K^0} = |s\bar{d}> \tag{1.2}$$

Da aber beide Zustände sowohl in zwei als auch in drei Pionen zerfallen, können die Teilchen mischen. Die beiden Zustände sind aber keine Eigenzustände der CP-Operation.

$$CP|K^0\rangle = -1|\overline{K^0}\rangle \tag{1.3}$$

| | | |
|---|---|---|
| linkshändiges Neutrino | $\longleftrightarrow$ C | (linkshändiges Antineutrino) |
| P$\updownarrow$ | CP$\searrow$ | P$\updownarrow$ |
| (rechtshändiges Neutrino) | $\longleftrightarrow$ P | rechtshändiges Antineutrino |

Tabelle 1.1: Neutrinos und C und P Operationen [Pov99]

$$CP|\overline{K^0}\rangle = +1|K^0\rangle \quad (1.4)$$

Die Linearkombination beider Zustände sind CP-Eigenzustände und sind in guter Näherung auch die beiden nachgewiesenen Teilchen $K_L$ und $K_S$.

$$|K_1^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\{|K^0\rangle - |\overline{K^0}\rangle\} \quad (1.5)$$

$$|K_2^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\{|K^0\rangle + |\overline{K^0}\rangle\} \quad (1.6)$$

$$CP|K_1^0\rangle = +1|K_1^0\rangle \quad (1.7)$$

$$CP|K_2^0\rangle = -1|K_2^0\rangle \quad (1.8)$$

Da das Pion eine negative intrinsische Parität besitzt, kann $K_1^0$ mit einer positiven CP nur in zwei Pionen zerfallen, während $K_2^0$ nur in drei Pionen zerfallen darf. Da der Phasenraum für einen Zerfall in drei Pionen wesentlich kleiner als für einen Zerfall in zwei Pionen ist, ist die Lebensdauer des $K_2^0$ wesentlich länger als die des $K_1^0$. Experimente wie das von J.H. Christenson 1964 [Chr64] haben aber gezeigt, daß mit einer sehr kleinen Wahrscheinlichkeit ($3 \times 10^{-3}$) ein langlebiges Kaon auch in zwei Pionen zerfallen kann. Dies lässt zwei Schlüsse zu: entweder ist der Eigenzustand der starken Wechselwirkung $K_L^0$ nicht identisch mit dem CP-Eigenzustand $K_2^0$, was eine indirekte Verletzung der CP-Erhaltung bedeuten würde, oder der Zerfall des $K_2^0$ in zwei Pionen ist doch erlaubt, was die CP-Erhaltung direkt verletzt. Diese Effekte sind mit einer Erklärung durch die CKM-Matrix verträglich, können aber über das Standardmodell hinausgehende Theorien weder bestätigen noch widerlegen. Da im B-Mesonensystem mehr Zerfallskanäle als im Kaonensystem existieren, bietet sich dort die Möglichkeit, neue Einblicke zu gewinnen.
Im Standardmodell sind die Masseneigenzustände der Quarks nicht identisch mit den Eigenzuständen der schwachen Wechselwirkung. Als Konvention wird festgelegt, daß die drei Quarks mit einer Ladung von $\frac{2}{3}q_e$ (u, c, t) nicht mischen, während die Mischung der übrigen drei Quarks durch eine unitäre 3x3 Matrix beschrieben wird, die CKM-Matrix

$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \quad (1.9)$$

Diese Matrix wird durch vier Parameter definiert. Eine mögliche Parametrisierung mit den Parametern $\rho, \lambda, \eta$ und A stammt von L. Wolfenstein [Wol45] und ist eine Entwicklung nach der Variable $\lambda \equiv |V_{us}| = \sin\theta_c \approx 0.22$ [Cab63]: $V_{CKM} \approx V_{CKM}^{(3)} + \delta V_{CKM}$, wobei die Entwicklung bis zur dritten Ordnung in $\lambda$ durch

$$V_{CKM}^{(3)} = \begin{pmatrix} 1-\lambda^2/2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1-\lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1-\rho-i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} \quad (1.10)$$

gegeben ist. Die Entwicklung bis zur dritten Ordnung ist aber für Rechnungen zur CP-Verletzung im B-Mesonensystem nicht ausreichend, und der Term

$$\delta V_{CKM} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -iA^2\lambda^5\eta & 0 & 0 \\ A(\rho+i\eta)\lambda^5/2 & (1/2-\rho)A\lambda^4 - iA\lambda^4\eta & 0 \end{pmatrix} \tag{1.11}$$

ist nicht vernachlässigbar klein.
Die Forderung nach Unitarität dieser Matrix $V_{CKM}^{\dagger} \cdot V_{CKM} = 1 = V_{CKM} \cdot V_{CKM}^{\dagger}$ führt zu einem Gleichungssystem aus 12 Gleichungen, wovon 6 Normalisierungs- und 6 Orthogonalisierungsrelationen sind. Die letzteren lassen sich durch 6 Dreiecke gleicher Fläche in der komplexen Ebene darstellen. Allerdings sind nur in Zweien alle drei Seiten von vergleichbarer Größe. Die zu diesen beiden Dreiecken gehörigen Orthogonalitätsrelationen sind durch

$$V_{ud}V_{ub}^* + V_{cd}V_{cb}^* + V_{td}V_{tb}^* = 0 \tag{1.12}$$
$$V_{ud}^*V_{td} + V_{us}^*V_{ts} + V_{ub}^*V_{tb} = 0 \tag{1.13}$$

gegeben.
In der dritten Ordnung in $\lambda$ stimmen die beiden Dreiecke miteinander überein, weswegen man auch oft von “dem” Unitaritätsdreieck der CKM-Matrix spricht. Die Meßgenauigkeit bei LHC-b macht allerdings eine Entwicklung bis zu vierter Ordnung notwendig. Die beiden Dreiecke sind in Abb. 1.1 dargestellt.
Die beiden Variablen $\bar{\rho}$ und $\bar{\eta}$ sind durch

$$\bar{\rho} = (1/\lambda^2/2)\rho \tag{1.14}$$
$$\bar{\eta} = (1-\lambda^2/2)\eta \tag{1.15}$$

mit $\rho$ und $\eta$ verknüpft. Die in den Dreiecken vorkommenden Winkel können durch zwei Methoden bestimmt werden: direkt aus CP-Assymetrien innerhalb des Standardmodells, oder indirekt über die Seitenlängen. Sollten die zwei Werte nicht miteinander übereinstimmen, wäre dies ein Zeichen für neue Physik.
Die in Abb. 1.1 mit a bis d bezeichneten Seiten sind durch folgende Gleichungen

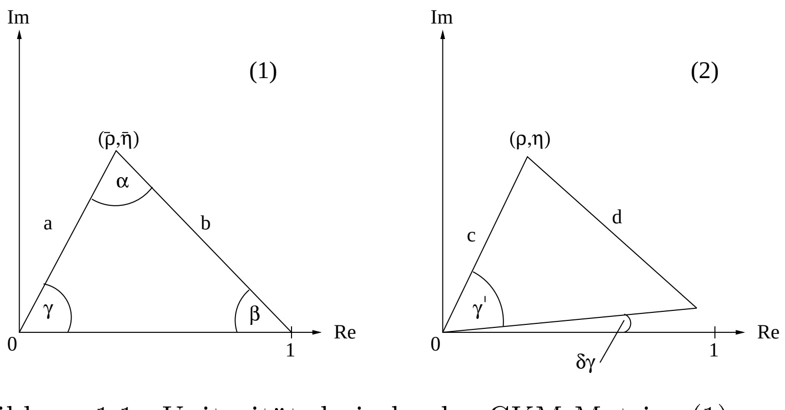


Abbildung 1.1: Unitaritätsdreiecke der CKM-Matrix; (1) und (2) entsprechen den Gleichungen 1.12 und 1.13

| gemessener Parameter | Zerfallskanal | sichtbares Verzweigungsverhältnis |
|---|---|---|
| $\alpha$ | $B_d^0 \to \begin{cases} \pi\pi \\ \rho\pi \quad \to \quad \pi^+\pi^-\pi^0 \\ D^*n\pi \end{cases}$ | $0.5 \times 10^{-5}$<br>$5.5 \times 10^{-5}$<br>$6.7 \times 10^{-5}$ |
| $\beta$ | $B_d^0 \to J/\psi K_s \to l^+l^-\pi^+\pi^-$ | $3.6 \times 10^{-5}$ |
| $\gamma$ | $B_d^0 \to \begin{cases} \overline{D^0}K^{*0} \\ D^0K^{*0} \\ D_1K^{*0} \end{cases}$ | $10^{-8} - 10^{-7}$ |
| $\gamma - 2\delta\gamma$ | $B_s^0 \to D_s^\pm K^\mp \to K^+K^-\pi^\pm K^\mp$ | $0.9 \times 10^{-5}$ |
| $\delta\gamma$ | $B_s^0 \to J/\psi\phi \to l^+l^-K^+K^-$ | $5.4 \times 10^{-5}$ |

Tabelle 1.2: Die wichtigsten Zerfallskanäle bei LHC-b

gegeben:

$$a = \frac{(1-\lambda^2/2)V_{ub}^*}{\lambda|V_{cb}|} \tag{1.16}$$

$$b = \frac{V_{td}}{\lambda|V_{cb}|} \tag{1.17}$$

$$c = \frac{V_{ub}^*}{\lambda|V_{cb}|} \tag{1.18}$$

$$d = \frac{(1-\lambda^2/2)V_{td}}{\lambda|V_{cb}|} \tag{1.19}$$

Die Werte von $|V_{cb}|$ und $|V_{ub}|$ werden durch B-Zerfälle, der von $|V_{td}|$ über $B_d^0 - \overline{B_d^0}$-Oszillationen bestimmt.
Die direkten Messungen sind über die in Tabelle 1.2 aufgeführten Zerfälle bestimmbar. Die Winkel werden dabei aus den Unterschieden zwischen den Zerfällen von B und $\overline{\mathrm{B}}$ bestimmt. So ist

$$\sin(2\beta) \sim \frac{\Gamma(B_d \to J/\psi K_s^0) - \Gamma(\overline{B_d} \to J/\psi K_s^0)}{\Gamma(B_d \to J/\psi K_s^0) + \Gamma(\overline{B_d} \to J/\psi K_s^0)} \tag{1.20}$$

Dabei sind die auftretenden Verzweigungsverhältnisse wie aufgeführt sehr klein. Dies unterstreicht die Notwendigkeit einer hohen Statistik von B-Mesonen, um eine ausreichende Anzahl von Zerfällen nachzuweisen. Außerdem muß der Detektor in der Lage sein, effektiv zwischen Pionen und Kaonen unterscheiden zu können, um die einzelnen Zerfallskanäle zu trennen. Die beiden unten beschriebenen RICHes sind für diese Trennung verantwortlich, unterstützt durch das Spurkammersystem, welches die zur Rekonstruktion der Cherenkovlichtkegel nötigen Richtungsinformation liefert und die Signale in beiden RICHes zu einzelnen Teilchenspuren verbindet.

## 1.2 LHC und LHC-b

LHC steht für "Large Hadron Collider" und ist die Bezeichnung eines neuen Teilchenbeschleunigers, welcher momentan im Tunnel des Beschleunigers LEP auf dem Gelände des CERN in Genf errichtet wird und 2006 fertiggestellt sein wird. Anstatt wie bei LEP Elektronen und Positronen zur Kollision zu bringen, werden bei LHC Protonen auf Protonen geschossen. Allerdings sind auch Beschleunigungsläufe mit schweren Ionen wie zum Beispiel Gold geplant. In Abb. 1.2 ist eine schematische Darstellung vom LHC-Projekt zu sehen. Es wird insgesamt vier große Experimente geben: ALICE [ALI95], ATLAS [ATL94], CMS [CMS94] und LHC-b [LHC98].

Die Designluminosität des LHC beträgt $10^{34}\frac{1}{\mathrm{cm}^2\mathrm{s}}$. Diese wird aber erst nach drei Jah-

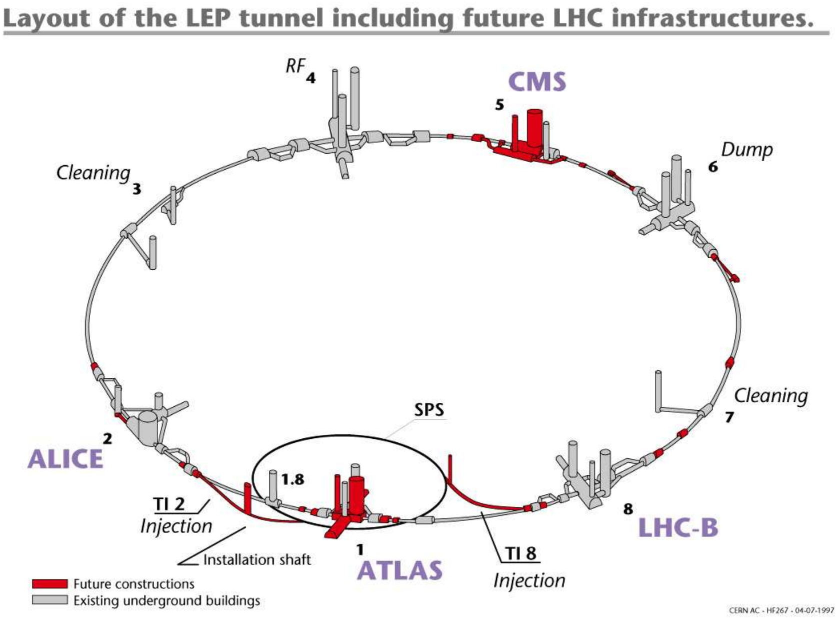


Abbildung 1.2: Übersicht über LHC. Zu sehen sind das SPS, der LEP-Tunnel und die zu den Experimenten gehörenden Einrichtungen.

ren erreicht werden. Die Anfangsluminosität wird bei $10^{33}\frac{1}{\mathrm{cm}^2\mathrm{s}}$ liegen. Eine spezielle Wechselwirkungsoptik ermöglicht es, bei LHC-b die Luminosität unabhängig vom Zustand der Maschine zu steuern. Es ist geplant, sie konstant auf $2 \times 10^{32}\frac{1}{\mathrm{cm}^2\mathrm{s}}$ zu regeln, um dafür zu sorgen, daß 75% der Ereignisse aus nur einer Kollision zweier Protonen besteht. Die Notwendigkeit dieser Maßnahme wird in Abb. 1.3 deutlich, die das Ergebnis einer einzelnen Proton-Proton-Kollision zeigt. Die Linien entsprechen Spuren einzelner Teilchen, von denen pro Kollision im Durchschnitt 200 auftreten. Im Falle einer Kollision von mehr als zwei Protonen wäre die Anzahl der Spuren vervielfacht, was eine Unterscheidung zwischen den einzelnen Spuren unmöglich machen würde. Bei dieser Luminosität werden $4.5 \times 10^{11} B_d + \overline{B_d}$ und $1.3 \times 10^{11} B_s + \overline{B_s}$ pro Jahr erwartet. Außerdem ist noch zu berücksichtigen, daß die Wechselwirkungsrate bei LHC 40 MHz beträgt, was bedeutet, daß alle 25 ns ein solches Ereignis stattfinden könnte.

Der LHC-b-Detektor [LHC98] besteht aus einem Einzel-Arm-Spektrometer, welches

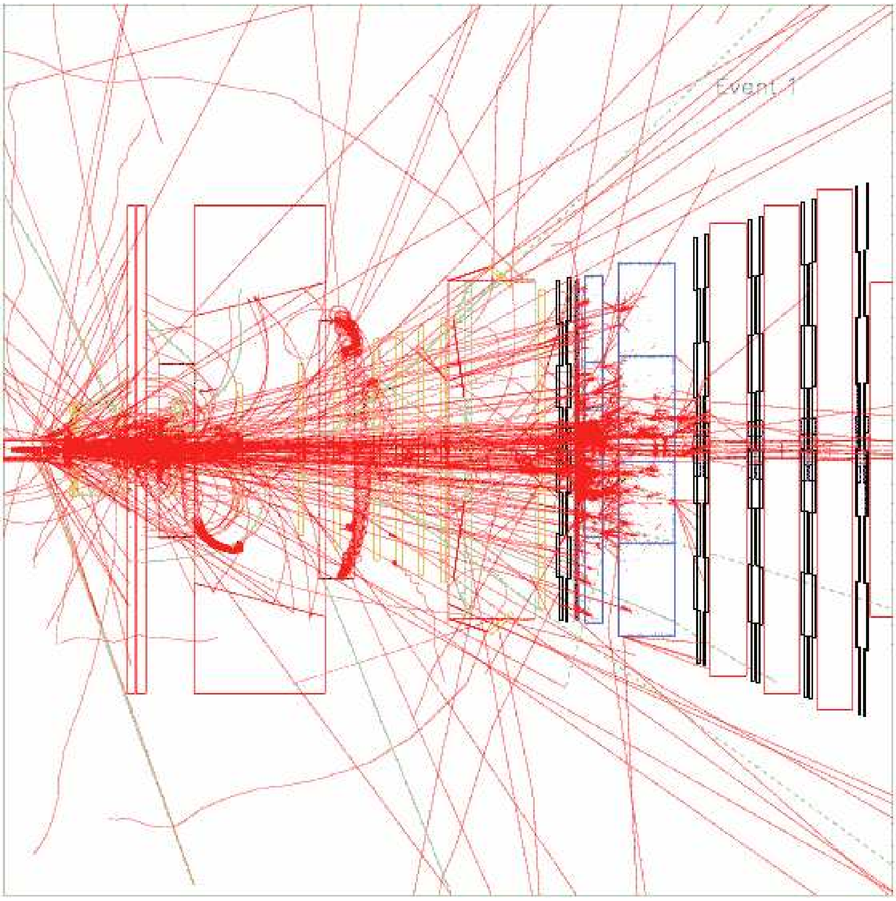


Abbildung 1.3: einzelne Proton-Proton Kollision in LHC-b. Die Linien zeigen, wie sich die produzierten Teilchen im Detektor verteilen.

dafür optimiert ist, die bei hohen Energien hauptsächlich in Vorwärtsrichtung zerfallenden b- und $\overline{\mathrm{b}}$-Hadronen nachzuweisen. Der abgedeckte Raumwinkel liegt in der horizontalen Ebene (auch ablenkende Ebene genannt, da der Magnet die Bahnen der geladenen Teilchen horizontal ablenkt) zwischen 10 und 300 mrad, in der senkrechten zwischen 10 und 250 mrad.
Aufgebaut wird der Detektor am Wechselwirkungspunkt 8, wo sich bisher das DELPHI-Experiment befand. Das im LHC-b-Detektor verwendete Koordinatensystem ist als ein Rechtshändiges definiert, bei welchem die z-Achse entlang des Strahles und die y-Achse nach oben zeigt. Der Ursprung des Koordinatensystems befindet sich im Wechselwirkungspunkt. Abb. 1.4 zeigt eine Aufsicht des gesamten Detektors, Abb. 1.5 eine Seitenansicht. Im Bereich des Spurkammersystems hat sich noch eine Änderung ergeben: Stationen T4 und T11 wurde gestrichen, so daß das Spurkammersystem nur noch aus 9 Stationen besteht.

Das LHC-b Experiment besteht aus mehreren Subkomponenten. In der Reihenfolge vom Wechselwirkungspunkt gesehen sind dies:

- Vertexdetektor

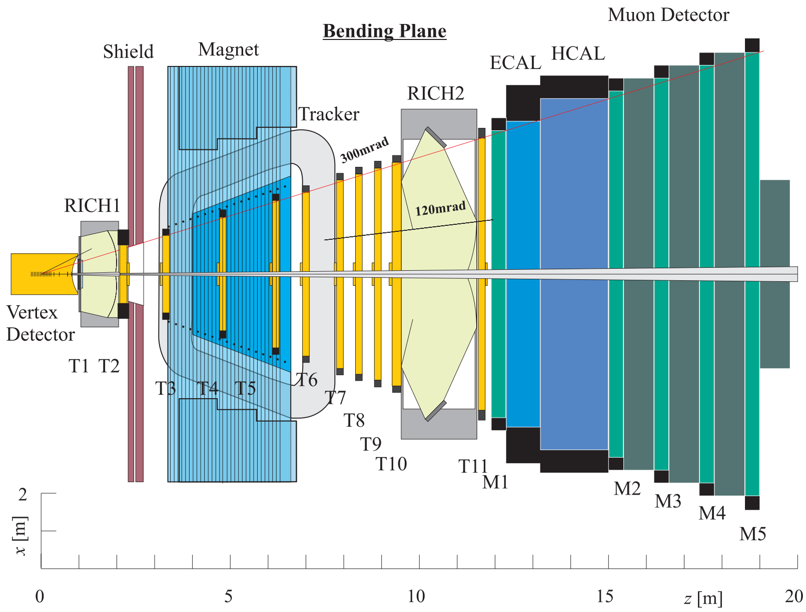


Abbildung 1.4: Der LHC-b-Detektor, von oben gesehen

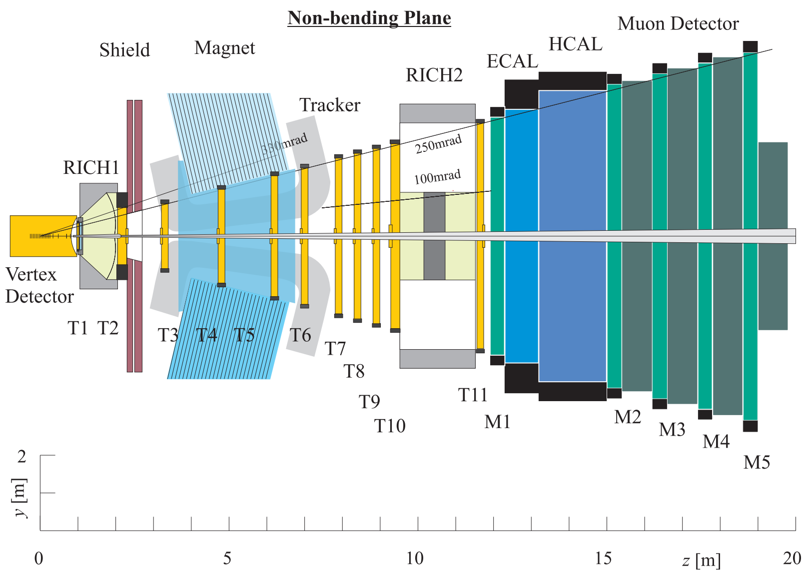


Abbildung 1.5: Der LHC-b-Detektor, Seitenansicht

- zwei Ring Imaging Cherenkov Counter (RICH)
- Magnet
- Spurkammersystem (Tracking), unterteilt in ein Inneres und ein Äußeres
- Elektromagnetisches Kalorimeter
- Hadronisches Kalorimeter
- Myondetektor

Der Vertexdetektor besteht aus mehreren Lagen von Siliziumstreifendektektoren, verteilt zwischen z = −18cm und z = +80cm. Der gesamte Detektor befindet sich innerhalb der Strahlröhre, die an diesem Punkt auf 1.20 m ausgedehnt ist. Seine Aufgabe ist, wie der Name schon andeutet, die genaue Lokalisierung des Kollisionspunktes der Protonen und eine präzise Auflösung von Sekundärvertizes, welche weniger als 1 cm vom Primärvertex entfernt sind, zu ermöglichen.
Die beiden RICHes, einer vor und einer nach Magneten und Spurkammersystem, dienen zur Trennung von Pionen und Kaonen, um die einzelnen Zerfallskanäle der B-Mesonen zu unterscheiden.
Der normalleitende Magnet erzeugt ein senkrecht orientiertes Dipolfeld mit einer maximalen Feldstärke von 1.1 T und dient zusammen mit dem Spurkammersystem der Impulsbestimmung aus der Krümmung der Spuren. Die Trackingstationen T3 bis T5 befinden sich innerhalb des Magneten, T1 und T2 davor, T6 bis T9 dahinter. Das Spurkammersystem besteht aus zwei separaten Teilen: einer inneren und einer äußeren Spurkammer. Die innere basiert auf einer Siliziumstreifentechnologie. Ihre Geometrie ähnelt einem Kreuz wie in Abb. 1.8 dargestellt. Die Maße sind durch die erwarteten Teilchenraten definiert und wurden so gewählt, daß die Occupancy[1] in den äußeren Spurkammern nicht 15 % überschreitet.
Der nicht von der inneren Spurkammer abgedeckte Bereich wird von der äußeren übernommen, welche auf der Strawtechnologie basiert, die in Kap. 1.3 vorgestellt wird. Das Engagement der LHC-b-Gruppe des Physikalischen Instituts Heidelberg konzentriert sich auf diesen Teil des Detektors. Da sowohl die Straws als auch die Siliziumstreifen nur eine Ortsinformation in einer Dimension, nämlich senkrecht zu der Anodenrichtung, liefern, besteht eine Station aus vier Doppellagen:

- Senkrechte Lage
- Um $+5^\circ$ zur Senkrechten verdrehte Lage
- Um $-5^\circ$ zur Senkrechten verdrehte Lage
- Senkrechte Lage

Durch diese Stereolagen kann auch die Lage der Spuren entlang der y-Achse gemessen werden.
Das Elektromagnetische Kalorimeter wird eine "Schaschlik"-Technologie verwenden, das heißt es besteht aus abwechselnden Bleiabsorber- und Szintillatorplatten.
Das Hadronische Kalorimeter wird nach einer ähnlichen Technik gebaut, allerdings ist das als Absorber verwendete Material Stahl.
Die vom Wechselwirkungspunkt aus gesehen letzte Komponente ist das Myonensystem. Dieses wird mit zwei verschiedenen Technologien gebaut: Vieldrahtproportionalkammern und "single-gap resistive plate"-Kammern.

[1] Occupancy ist der prozentuale Anteil getroffener Kanäle pro Kollision

## 1.3 Straws

Die vom Outer Tracker verwendeten Straws bestehen aus einer leitfähigen Kathodenröhre (hier mit 25 Volumenprozent Kohlenstoff dotiertes Kapton) mit einem Durchmesser von 5 mm und einem in der Mitte gespannten Draht, sind also Proportionalzählrohre, wobei auch die Driftzeit der Elektronen gemessen wird, um eine Auflösung von unter 200$\mu$m senkrecht zum Draht zu erreichen. Ein Proportionalzählrohr mit einem einfallenden Teilchen ist schematisch in Abb. 1.6 dargestellt.

Durch die am Draht angelegte positive Spannung wird ein elektrisches Feld erzeugt,

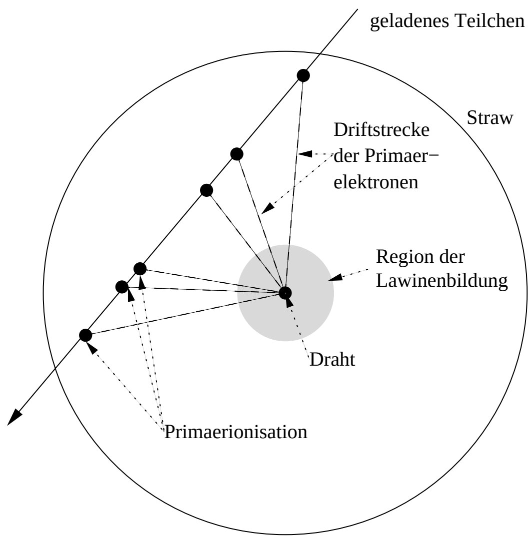


Abbildung 1.6: Querschnitt durch einen Straw mit eindringendem geladenen Teilchen und Primärionisation

welches sich aus

$$E(r) = \frac{V_0}{ln(b/a)r} \tag{1.21}$$

| | |
|---|---|
| $V_0$ | Am Draht angelegte Spannung |
| $r$ | Abstand vom Zentrum |
| $a$ | Radius des Drahtes (typisch $20 - 30\mu$m) |
| $b$ | Radius des Straws |

ergibt.

Wenn ein geladenes Teilchen in dieses Zählrohr eindringt, kann es Moleküle des Zählgases durch Wechselwirkungen mit der Elektronenhülle ionisieren, wobei es kinetische Energie verliert. Dieser Energieverlust entlang der Spur wird durch die Bethe-Bloch-Formel [Pov99] näherungsweise gegeben:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi r_e^2 m_e c^2 N_A z^2 \rho}{\beta^2} \frac{Z}{A} \left[ ln\left(\frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{I}\right) - \beta^2 \right] \tag{1.22}$$

| | |
|---|---|
| $r_e$ | Elektronenradius aus klassischer Elektrodynamik ($\approx 2.8$fm) |
| $m_e$ | Elektronenmasse |
| $c$ | Lichtgeschwindigkeit |
| $N_A$ | Avogadrozahl |
| $z$ | Ladung des einlaufenden Teilchens in Vielfachen von $e$ |
| $\rho$ | Dichte des Zählgases |
| $Z$ | Ladungszahl des zu ionisierenden Gasmoleküls |
| $A$ | Massenzahl des zu ionisierenden Gasmoleküls |
| $\beta$ | Geschwindigkeit des einlaufenden Teilchens in Vielfachen von $c$ |
| $\gamma$ | Gammafaktor ($1/\sqrt{1-\beta^2}$) |
| $I$ | mittleres Ionisierungspotential ($\approx 16\text{eV} \times Z^{0.9}, Z > 1$) |

Da das Teilchen entlang seiner Spur nur an einigen Punkten Elektronen erzeugt, entstehen durch die Gasverstärkung Ionisationscluster, die nacheinander am Draht ankommen. Das Spektrum der erzeugten Ladung wird durch die Landauverteilung [Lan65] beschrieben, welche durch

$$\phi(\lambda) = \frac{1}{2i\pi} \int_{e^{-i\infty}}^{e^{+i\infty}} e^{s\log(s)+\lambda s} ds \tag{1.23}$$

gegeben ist. Eine mittels einer Näherung berechnete Landauverteilung ist in Abb. 4.2 zu sehen.
Photonen deponieren im Gegensatz zu geladenen Teilchen ihre gesamte Energie in einem kleinen Raumgebiet; die durch sie erzeugte Ladungsverteilung ist daher durch ihr Energiespektrum bedingt.
Die hierbei erzeugten Ionen driften aufgrund ihrer Größe langsam zur Strawwand, während die durch das durchlaufende Teilchen erzeugten Primärelektronen (ca. 100 pro cm für minimal ionisierende Teilchen, für Photonen in Argon 38.5 pro keV Energie) zum Draht hin beschleunigt werden, bis sie Energien erreichen, die es ihnen erlauben, selbst Ionisation auszulösen. Die neu erzeugten Elektronen werden ihrerseits beschleunigt, bis sie ebenfalls Ionisation auslösen, was sich noch mehrmals wiederholt. Dies führt zu einer Ladungslawine in Drahtnähe, die über einen Verstärker gemessen wird. Dabei ist die Gesamtladung proportional zu der Anzahl von Primärelektronen. Der Proportionalitätsfaktor heißt Gasverstärkung und ist abhängig von der am Draht anliegenden Spannung. In Abb. 5.13 ist der Zusammenhang zwischen am Draht angelegter Spannung und Gasverstärkung dargestellt. Über weite Bereiche ist ein exponentieller Zusammenhang zu erkennen. Erst bei sehr hohen Spannungen weicht die Kurve davon ab. Die Zeit, die zwischen Erzeugung der Primärelektronen und Nachweis der Gesamtladung verstreicht, ist abhängig vom Abstand der Erzeugung der Primärelektronen vom Draht. Daher ist es möglich, den Abstand der Teilchenspur vom Draht zu bestimmen. Die hieraus entstehende links-rechts-Ambivalenz läßt sich durch die Kombination mit den Ergebnissen weiterer Lagen auflösen.

## 1.4 Straws im LHC-b Experiment

Da im Experiment alle 25 ns ein Ereignis stattfindet, wäre es eigentlich nötig, daß ein getroffener Straw nach 25 ns wieder einsatzbereit ist. Da dies aber nicht möglich ist, besteht die Forderung, daß die entstandene Ladung nach zwei Wechselwirkungen, also spätestens nach 50 ns gesammelt und abgeleitet worden ist. Aus diesem Grund wird dem verwendeten Zählgas $Ar/CO_2$ noch $CF_4$ zugesetzt. $CF_4$ erhöht die Driftgeschwindigkeit der Elektronen, ist leider aber auch elektronegativ, kann also Primärelektronen absorbieren, bevor sie eine Ladungslawine ausgelöst haben. Dies hat auch einen großen Einfluß auf die Genauigkeit der Ortsmessung, wenn die Primärelektronen, die zuerst am Straw angekommen wären, absorbiert werden. Der im Experiment verwendete Verstärker ASD-BLR[2] spricht auf die erste Flanke eines aus dem Straw stammenden Pulses an, mißt also die Zeit zwischen Proton-Proton-Kollision und dem Ankommen der ersten Elektronen am Draht. Daraus wird ein Abstand senkrecht zur Einfallsrichtung der Strahlung rekonstruiert. Wie in Abb. 1.7 zu sehen ist, wird diese Rekonstruktion verfälscht, wenn das Primärelektron, welches dem Draht am nächsten ist, vom $CF_4$ absorbiert wird. Dies bedeutet, daß ein Kompromiß zwischen Schnelligkeit des Gases und Genauigkeit der Ortsmessung gefunden werden muß. Als Standardgas des äußeren Spurkammersystems wurde eine Mischung von $Ar/CO_2/CF_4$ 75/10/15 gewählt. Eine detaillierte Untersuchung der Eigenschaften verschiedener Gasmischungen ist in [Rus01] zu sehen.

Eine weitere Eigenschaft von $CF_4$ ist, daß Alterungseffekte durch seine Anwesenheit vermehrt auftreten können. Allgemein wird zwischen zwei Effekten unterschieden: Veränderung der Gasverstärkung und Auftreten von Dunkelpulsen und einem Dunkelstrom. Die Veränderung der Gasverstärkung, eine Erniedrigung, die entlang des Drahtes variiert, wird meist durch eine Beschichtung der Anode verursacht. Dunkelpulse, also Pulse, die nicht durch Bestrahlung verursacht werden, hängen oft mit dem Abschlagen einer Schicht auf der Kathode zusammen. Die Niederschläge können aus einer Vielzahl von Materialien bestehen, von Polymeren bis zu reinem Kohlenstoff, und ebensoviele Ursachen haben, von der Gaszusammensetzung (einschließlich Verunreinigungen) bis zu beim Bau verwendeten Materialien. So können zum Beispiel im Gas enthaltene Kohlenwasserstoffe aufbrechen und langkettige Moleküle bilden, welche sich dann auf Anode oder Kathode niederschlagen. Daher wurde bei LHC-b auch darauf verzichtet, Kohlenwasserstoffe im Gas zu benutzen und stattdessen $CO_2$ zu verwenden. Allen ist jedoch gemein, daß sie erst auftreten, wenn eine hohe Ladung pro Länge auf der Anode gesammelt wurde. Daher muß bei einem Alterungstest eine möglichst große Ladung unter sonst realen Bedingungen gesammelt werden. Eine ausführliche Beschreibung des Phänomens der Gasalterung ist in [Kad90] nachzulesen.

Eine Station des Spurkammersystems ist in Abb. 1.8 gezeigt. Dort ist auch zu sehen, wie die Station aus einzelnen Modulen zusammengebaut werden soll. Ein Modul enthält zwei Lagen mit jeweils 64 Straws. Der Abstand zweier benachbarter Drähte beträgt 5.25 mm, um eine dichte Packung zu ermöglichen. Damit hat ein Modul eine Breite von 340 mm. In der Mitte der Stationshöhe sind die Drähte unterbrochen. Da die Straws sowohl am oberen als auch am unteren Ende ausgelesen werden, halbiert sich so die Occupancy.

Die Stationen im Magneten haben die Besonderheit, daß durch die Abmessungen des Magneten die maximale Stationsgröße vorgegeben ist. Die Höhe, die Strawhalterung, Elektronik und Kabel brauchen, geht an aktivem Detektionsvolumen verloren. Daher

[2]Der ASD-BLR ist ein für das ATLAS-Experiment entwickelter schneller Achtkanalvorverstärker mit einem digitalen Ausgang und einer Integrationszeit von 15 ns [Bev96]

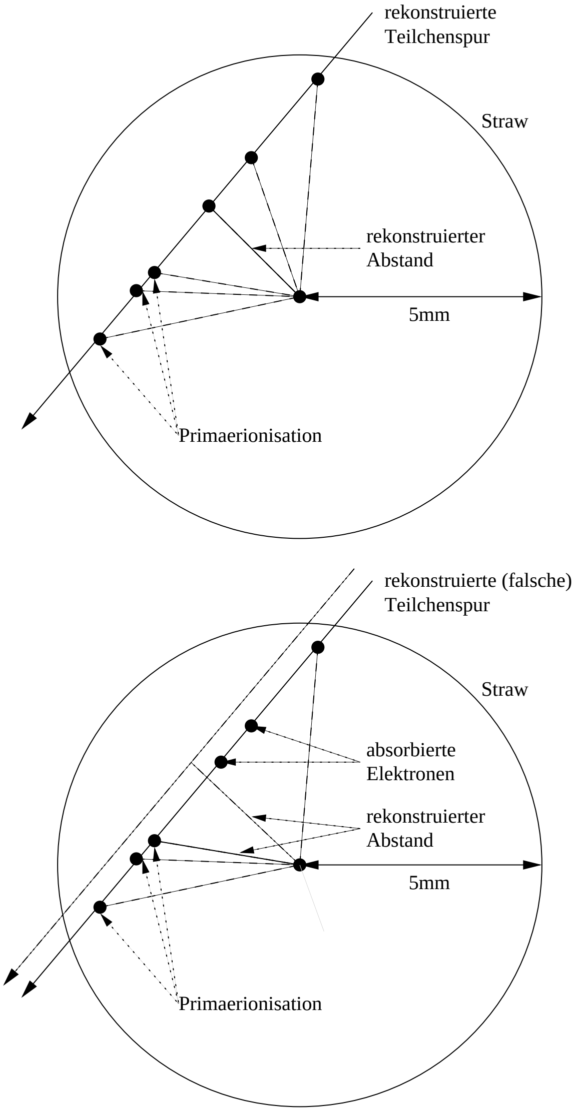


Abbildung 1.7: Einfluß von $CF_4$ auf die Genauigkeit der Ortsmessung; oben ist die Rekonstruktion einer Spur ohne Absorption von Primärelektronen gezeigt, unten mit Absorbtion. Da nur die Entfernung zum nächsten am Draht ankommenden Primärelektron gemessen wird, ist die Spur ist um $500\mu$m versetzt.

ist es dort besonders wichtig, auf eine kompakte und effektive Bauweise der Endregionen zu achten. Die übrigen Konstruktionsmerkmale der Module wie zum Beispiel die Drahttrennung in der Mitte sind für alle Stationen wichtig.
Genauere Ausführungen zu Straws und Driftkammern finden sich in [Sau77] und [Kle87].

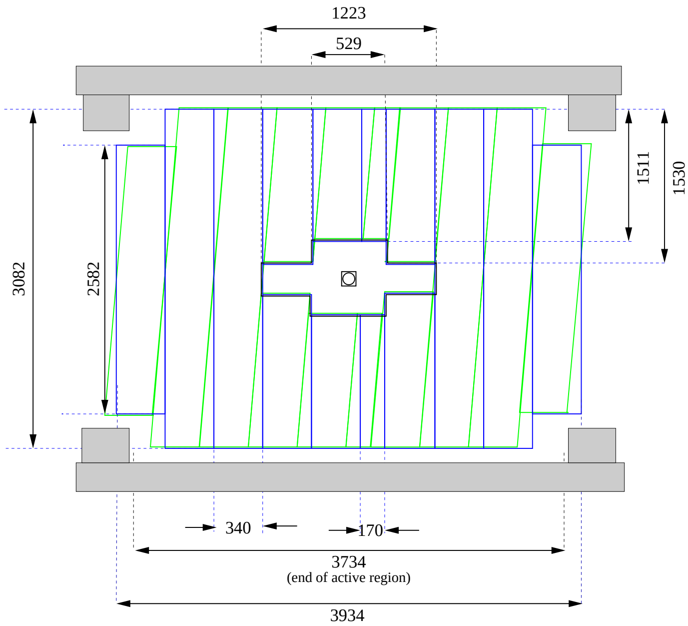


Abbildung 1.8: Darstellung der Station T4 innerhalb des Magneten, mit einer Stereolage, alle Angaben in mm

# Kapitel 2

# Moduldesign

Ein großer Teil dieser Diplomarbeit beschäftigte sich mit der Entwicklung eines funktionsfähigen Moduls zum Einsatz am LHC-b Outer Tracker. In diesem Zusammenhang wurden viele Konzepte vorgeschlagen und auch wieder verworfen. Die Entwicklung des Moduldesigns ist noch nicht abgeschlossen. Ein Konzept, welches in einem Prototypen realisiert wurde, wird in Abschnitt 2.2 vorgestellt.

## 2.1 Vorläufige Konzepte

Beim Design unseres Moduls gab es mehrere Probleme zu lösen. Es waren hauptsächlich folgende:

- Zusammensetzung des Straws
- Ausführung der Grundplatte
- Art der Befestigung des Drahtes
- Drahttrennung in der Mitte
- Zentrierung des Drahtes im Straw (Twister)
- Gaszuführung
- Strawhalterung am Ende (Endkappe)

Zu allen Punkten gab es mehrere Vorschläge, die im folgenden vorgestellt werden.

### 2.1.1 Zusammensetzung des Straws

Die meisten der in Heidelberg verwendeten Straws wurden von der Firma Lamina[1] gefertigt. Nachfolgend werden die getesteten Straws mit ihren Vor- und Nachteilen beschrieben. Die Aufzählung der Lagen erfolgt von Innen nach Außen.

**HERA-b Straw:**
Bestehend aus einer Lage Kapton-XC[2], einer Lage reinen Kaptons und einer Lage Kapton-XC.
Diese Straws waren zu Beginn leicht verfügbar und wurden daher in den ersten Tests verwendet. Ein Aufbau aus drei Lagen wäre allerdings zu dick und zu teuer, daher wurde auf diesen verzichtet.

**Straws mit aluminisiertem Mylar:**
Bestehend aus einer Lage Kapton-XC und einer Lage aluminisierter Mylarfolie.
Die Aluminiumschicht dieser Straws war zu dünn ($\approx 2\mu$m), um eine Abschirmung zu .
Außerdem sind die Straws nicht robust genug,was eine Verarbeitung sehr erschwerte.

**Double-Kapton-XC-Straws:**
Bestehend aus zwei Lagen Kapton-XC, wahlweise mit kohlenstoffdotiertem Kleber zwischen den Lagen.
Diese Straws lassen sich sehr gut verarbeiten, bieten aber keinen intrinsischen Schutz gegen eingekoppelte Störungen oder Crosstalk (siehe Kap. 4.2)

**Aluminiumstraws:**
Bestehend aus einer Lage Kapton-XC und einer Lage $25\mu$m Aluminiumfolie.
Diese Straws verbinden die Robustheit der Double-Kapton-XC Straws mit einer Abschirmung gegen einfallende Störungen, wie in Kap. 4.2 gezeigt, und wurden daher als Standardstraws ausgewählt.

### 2.1.2 Ausführung der Grundplatte

Die Grundplatte soll garantieren, daß die Straws sich nicht durch die Spannung der Drähte verbiegen, da diese allein nicht stabil genug sind, um die Spannung aufzunehmen. Außerdem ist die Fertigung einfacher, wenn die Straws auf einer Fläche aufgeklebt werden können. Es wurde kurz angedacht, anstatt eine Grundplatte zu benutzen, die Straws miteinander zu verbinden und Karbonfaserstäbe zur Verstärkung einzuziehen, um die Dicke in Strahlungslängen zu reduzieren. Nachfolgende Rechnungen zeigten aber, daß die nötige Anzahl und Durchmesser der Stäbe keine Verringerung der Dicke zugelassen hätte. Stattdessen ist geplant, die Straws auf eine Honeycomb-Platte, die aus zwei Lagen Karbonfasern jeweils mit einer Dicke von $100\mu$m und dem Honeycombmaterial, Nomex, besteht, zu kleben. Zwischen Straws und Honeycombplatte wird noch eine $25\mu$m dicke Aluminiumfolie eingezogen, die von außen eingestreute Störungen abschirmen und wie in Kap. 4.2 gezeigt den Crosstalk minimieren soll. Außerdem stellt die Folie ein allen Straws gemeinsames Massenpotential dar, welches durch die Endkappen hindurch mit der Ausleseelektronik verbunden ist.

[1] Lamina Dielectrics Ltd, Billingshorst, England

[2] Kapton-XC bezeichnet mit Kohlenstoff dotierte Kaptonfolie, welche dadurch leitfähig wird. Kapton XC-160 der Firma Du Pont enthält 25 Volumenprozent Kohlenstoff und hat eine Dicke von $40\mu$m

### 2.1.3 Drahtbefestigung

Die beiden Standardmethoden zur Drahtbefestigung in Driftkammern sind Löten und Crimpen. Da eine Lötung, die einen 25 $\mu$m dicken vergoldeten Wolframdraht unter einer Spannung von 70 g halten soll, ca. 10 mm lang sein muß, und bei den Stationen innerhalb des Magneten der Platz knapp ist, wurden einige Alternativen zum Löten untersucht.
Die häufigste Alternative, das Crimpen, ist eine Technik, bei der eine den Draht enthaltene Hülse mittels einer speziellen Zange zusammengequetscht wird, wobei sich die Atome des Drahtes in die Gitterstruktur der Crimphülse einbetten und so eine dauerhafte Verbindung garantieren. Diese Methode hat einige Nachteile, weswegen sie nicht weiter verfolgt wurde. So ist das Einfädeln des Drahtes in die Crimphülse unter besten Umständen schwierig. Da im LCH-b Outer Tracker ca. 130000 Straws verwendet werden, was aufgrund der Drahttrennung in der Mitte 520000 Drahtenden und damit Crimphülsen entspricht, wurde auf diese Technik verzichtet. Eine Möglichkeit, das Einfädeln des Drahtes in die Crimphülse zu erleichtern, könnte die in Abb. 2.1 gezeigte Apparatur sein. Zwei dieser Halbschalen werden aufeinandergesteckt, und auf der rechten Seite eine Crimphülse eingelegt. Ein Problem bei der Fertigung stellt die 35 $\mu$m breite Öffnung dar; diese könnte durch Einschmelzen mit einem heißen Draht gebildet werden. Leider ergab sich nicht die Gelegenheit, diese Einfädelhilfe zu testen.
Eine weitere Möglichkeit, den Draht zu befestigen, ist in Abb. 2.2 dargestellt. Hier

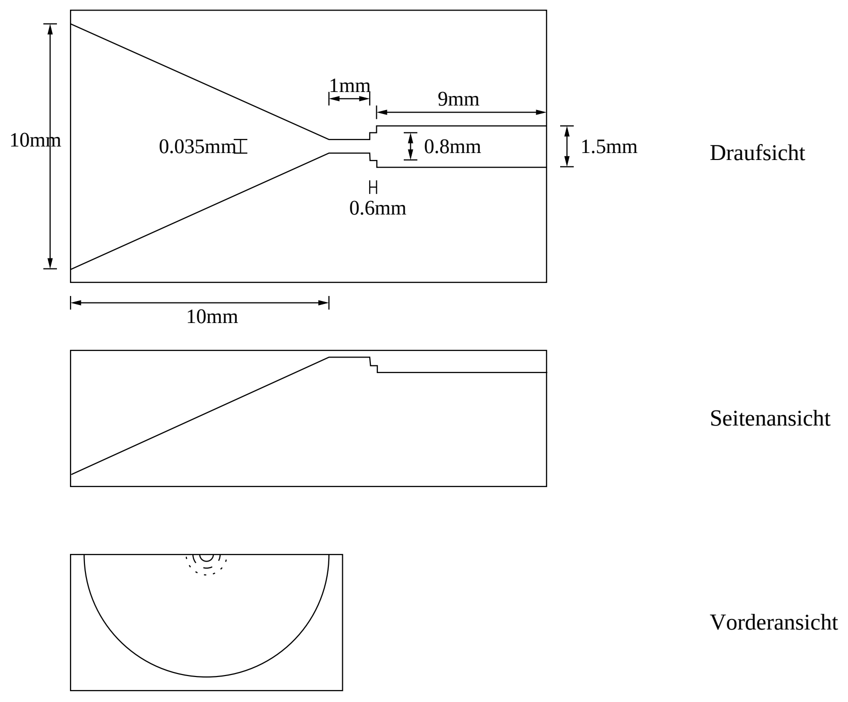


Abbildung 2.1: Einfädelhilfe für Crimphülsen. In die 1.5 mm breite Öffnung wird eine Crimphülse eingelegt, und die Vorrichtung mit einer identischen Halbschale geschlossen.

wird der Draht durch eine Kombination von Klemmen und Kleben gehalten. Die aus weichem Plastik gefertigte Kerbe wird mit einem dünnflüssigem Kleber (zum Beispiel STYCAST[3] gefüllt und der Draht hineingedrückt. Abschließend werden die Stifte zwischen zwei benachbarte Kerben angebracht, um den Draht zusätzlich zu klemmen. Da die Herstellung dieser Drahttrennung zu aufwendig gewesen wäre, wurde auch dieses Design nicht getestet.

Um den Zeitaufwand bei der Fertigung so gering wie möglich zu halten, wurde die

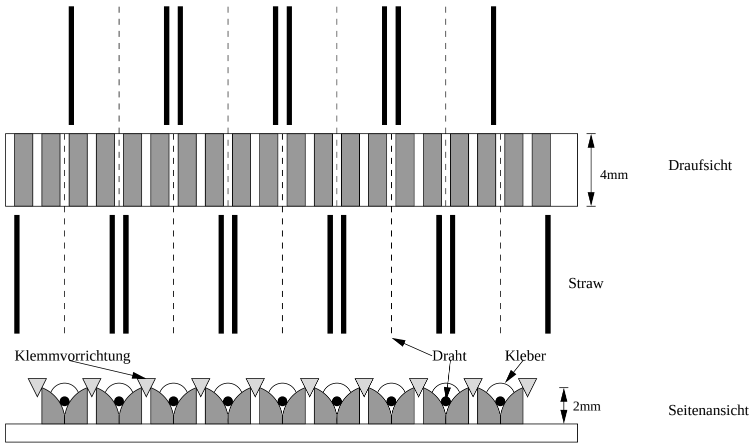


Abbildung 2.2: Ein Vorschlag zur Drahttrennung in der Mitte mit alternativer Drahtbefestigung durch eine Verbindung von Kleben und Quetschen.

Löttechnik zur Drahtbefestigung gewählt.

### 2.1.4 Drahttrennung

Der Grund für die Trennung der Drähte in der Mitte der Module ist eine Halbierung der Occupancy, indem jeweils die Hälfte aller Signale getrennt voneinander oben und unten ausgelesen wird. Zu diesem Zweck müssen die Drähte voneinander isoliert befestigt werden. Da immer die Möglichkeit besteht, dass ein Draht reißt und damit auf Erde liegt, darf der Abstand zwischen den beiden Enden nicht zu klein sein, um Hochspannungsüberschläge zu vermeiden. Andererseits befindet sich die Drahttrennung in der am stärksten bestrahlten Region des Detektors, was bedeutet, daß die ganze Konstruktion nicht zu lang werden darf, da der Detektor in der Trennung effektiv "tot" ist. Damit der Detektor nicht durch die Trennung in einer Region unempfindlich ist, werden die Trennungen in aufeinanderfolgenden Lagen gegeneinander verschoben, so daß pro Modul über die gesamte Höhe des Detektors mindestens eine Lage Teilchen nachweisen kann.

Eine der ersten Fragen war, ob die Straws durch das Gehäuse der Drahttrennung einzeln verbunden werden sollten, oder ob ein durchgehendes Gehäuse alle Drahttrennungen eines Moduls aufnimmt.

[3]STYCAST 1266: Sehr dünnflüssiger, nichtausgasender Zweikomponentenkleber.

Da eine wie in Abb. 2.3 gezeigte Drahttrennung aber den Produktionsaufwand und

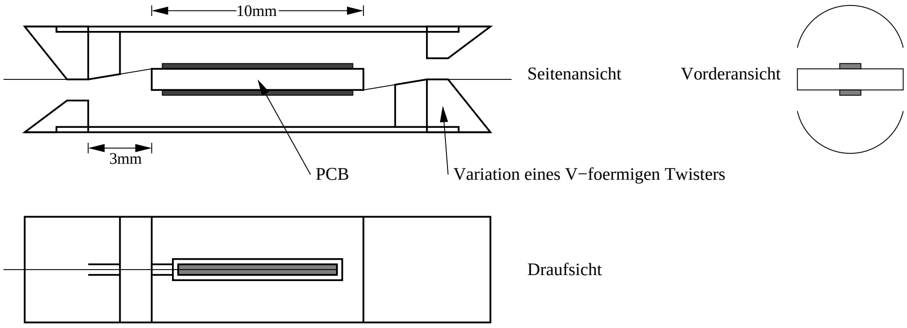


Abbildung 2.3: Drahttrennung mit einem Gehäuse pro Straw, bei der die beiden Drähte auf den beiden Seiten der Leiterplatte festgelötet werden, um die Länge zu reduzieren.

die Anzahl der verwendeten Teile erhöhen würde, wurde entschieden, ein Gehäuse für alle Drahttrennungen eines Moduls zu verwenden. Um die Fertigung der Teile weiter zu vereinfachen, entspricht dieses Mittelstück weitgehend der Endkappe, so daß nur eine Spritzgußform für beide Teile gefertigt werden muss (siehe Abb. 2.18). Befestigt werden die Drähte durch Lötung auf einer Platine.
Da das Mittelstück relativ lang wird, wenn zwei Drähte hintereinander angelötet werden (20 mm), wurde versucht, Alternativen zu finden. Die erste ist in Abb. 2.4 dargestellt. Der Draht wird, nachdem er aus den Straws kommt, um einen 1 mm dicken Poller gewickelt und anschließend schräg aufgelötet. Dadurch war es möglich, die Platine auf 12 mm zu verkürzen. Diese Anordnung wurde auch in einem Testmodul umgesetzt. Leider war es schwer, die Poller exakt zu positionieren, und es bedurfte eines großen Aufwands beim Löten, den Draht herumzuwickeln. Aus diesen Gründen wurde die Idee wieder verworfen. Um in der Drahttrennung trotzdem noch etwas Platz zu gewinnen, wurde ein Trick angewandt: die Straws unterhalb der Strahlachse sind gegenüber denen oberhalb um eine halbe Strawbreite seitlich verschoben. Dadurch ist es möglich, die Platine in der Drahttrennung wie in Abb. 2.5 links anstatt wie rechts gezeigt auszuführen. Da nun die Lötungen zweier gegenüberliegender Straws nebeneinander anstatt hintereinander liegen, wird die Gesamtlänge dieser Trennung um 10 mm verkürzt.

### 2.1.5 Twister

Es ist unumgänglich, bei einer Modullänge von mehr als einem Meter den Draht an mindestens einer Stelle im Straw selbst in Position zu halten, da sonst der Draht unter Hochspannung instabil und anfangen zu schwingen würde. Ebenso kann bei einer großen Zahl von gefertigten Straws kaum garantiert werden, daß die Drähte auf den Endstücken mit einer Genauigkeit von unter $100\mu$m festgelötet werden, daher ist es nötig, die Präzision durch eine Drahtfixierung zu garantieren. Aufgrund des lange Zeit vorherrschenden Designs wurden alle Drahtbefestigungen "Twister" genannt, auch wenn sie die unten beschriebene namensgebende Form nicht besitzen.

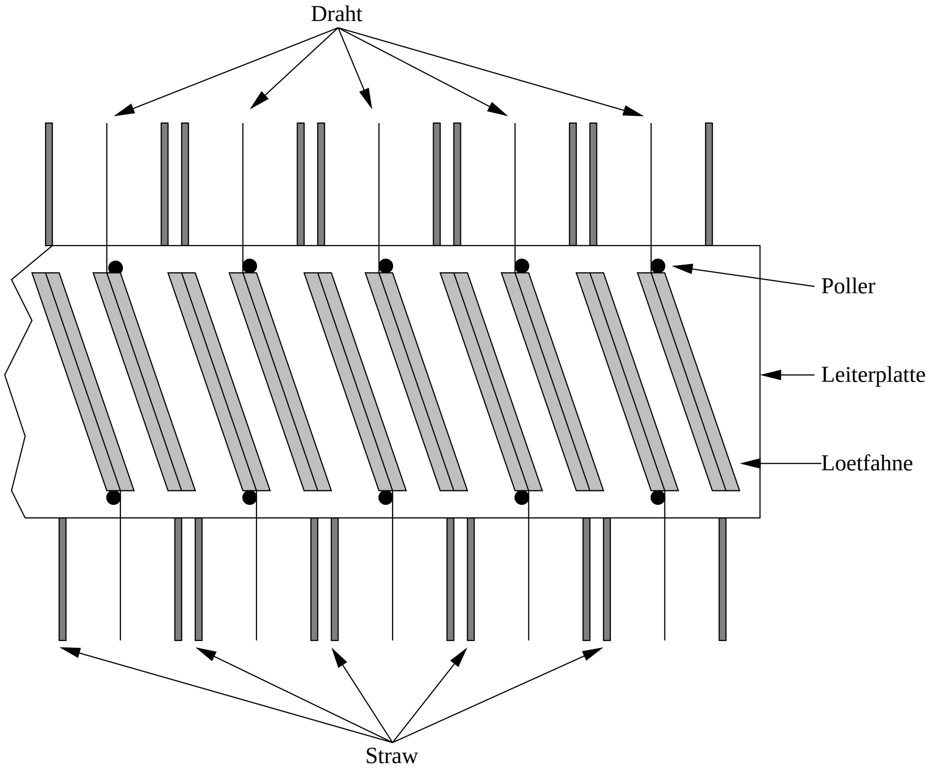


Abbildung 2.4: Leiterplatte zur Drahttrennung mit Pollern, um die die Drähte gewickelt werden

Das Hauptproblem beim Entwurf eines geeigneten Twisters war, daß es möglich sein mußte, nach Anbringung der Twister noch einen Draht in den Straw einzufädeln.

Eine Möglichkeit, dieses Problem zu umgehen, wurde zu Anfang vorgeschlagen. Wenn die Twister am Draht befestigt sind, kann der Draht zusammen mit den Halterungen durch den Straw gezogen werden, wie in Abb. 2.6 gezeigt. Diese Methode hat allerdings den Nachteil, daß das Risiko eines Drahtreißens größer als beim Durchfädeln durch im Straw angebrachte Twister ist, und daß sich die Drahtspannung aufgrund von Reibung nur ungleichmäßig verteilt, wenn die Twister beim Durchziehen die Strawwand berühren. Eine Variation dieses Designs, welche diesen Nachteil vermeidet, wird zur Zeit bei Nikhef, Amsterdam untersucht.

Das namensgebende Design des Twisters besteht aus einem Zylinder mit einer Schraubenwindung, die zum Durchfädeln des Drahtes und zur Ermöglichung des Gasflusses dient. Wenn der Draht durch die Windung geführt und gespannt wird, liegt er mit einer Genauigkeit von $50\mu$m im Zentrum des Zylinders. Dies setzt natürlich voraus, daß der Twister genau in den Straw passt, was durch die produktionsbedingten Toleranzen im Durchmesser der Straws (ca. $\pm 100\mu$m) nicht ganz der Fall ist. Der ursprüngliche Twister stammte aus dem HERA-b-Strawprojekt [Hoe99], hatte allerdings einige Nachteile. Die HERA-Straws sollten aus 50 cm langen "Strawlets" zusammengesetzt werden, wobei sich die Twister zwischen den Strawlets befanden und es somit möglich war, den Draht von Hand durchzufädeln. Dies wurde auch für das LHC-b-Design in Betracht gezogen, allerdings mit in "Kämmen" angeordneten Strawtrennungen, die in

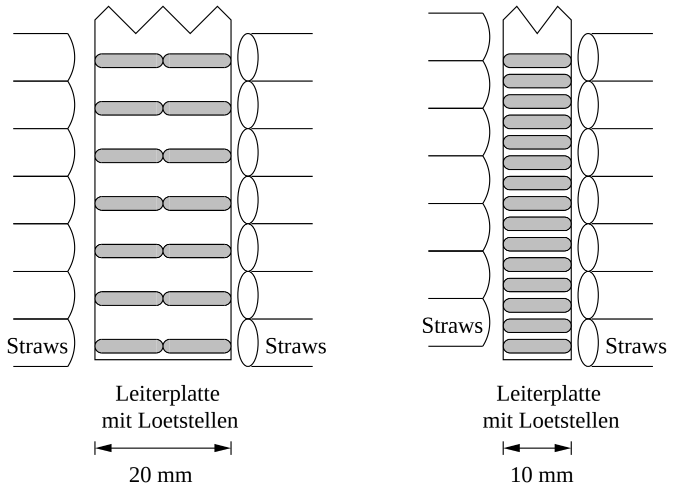


Abbildung 2.5: Zwei Möglichkeiten der Leiterplatte zur Drahttrennung; links: Straws in der oberen und unteren Hälfte des Moduls nicht gegeneinander versetzt, rechts mit Versetzung um eine halbe Strawbreite

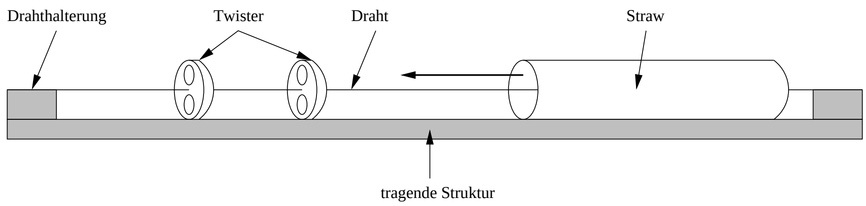


Abbildung 2.6: Auf dem Draht befestigte Twister, die zusammen in den Straw geführt werden

Abb. 2.7 und 2.8 zu sehen sind. Diese Trennung der Straws würde die Notwendigkeit für Twister im Strawinneren beseitigen, und damit auch das Problem, wie diese fixiert werden, allerdings auf Kosten eines höheren Aufwandes beim Modulbau, da mehr Einzelstraws und die Kämme benötigt würden.

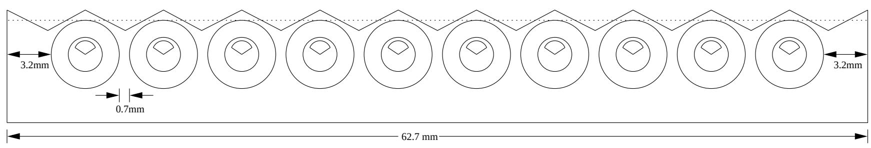


Abbildung 2.7: "Kamm" mit eingebauten Kreisausschnitt-Twister zum Aufbau eines Strawmoduls aus kurzen Strawstücken

Aus diesen Gründen wurde auch entschieden, die LHC-b-Straws über die halbe Stationshöhe nicht zu unterbrechen. Dies bedeutet aber auch, daß der Draht per Unterdruck durchgesaugt oder per Überdruck durchgeblasen werden muß, was beim HERA-b-Twister nicht möglich war.

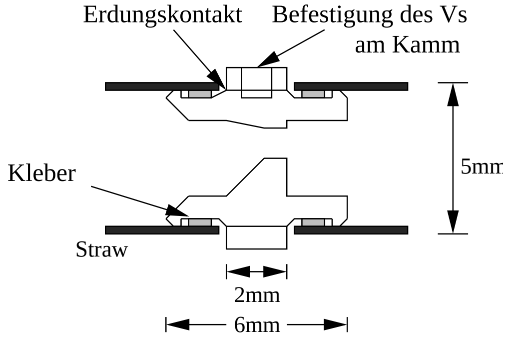


Abbildung 2.8: Querschnitt des “Kammes” zum Aufbau eines Straws aus kurzen Strawstücken. Die Außenseite des V’s ist vergoldet, um einen Kontakt zur Kathode zu gewährleisten.

Eine wesentliche Verbesserung stellte der von Nikhef, Amsterdam entwickelte “Nikhef-Twister” (Abb. 2.9) dar, der eine längere Windung und eine konische Vertiefung am Eingang aufweist, was das Durchfädeln stark vereinfacht. Der hier gezeigte ist eine leichte Variation dieses Designs, da er seitliche Kerben besitzt, die es ermöglichen, den Twister durch Zusammenquetschen des Straws zu befestigen.

Eine andere Art der Drahtpositionierung ist in Abb. 2.10 dargestellt. Eine kreisförmige Scheibe mit einem 90°-Ausschnitt definiert die Drahtposition in drei Richtungen; daher reichen zwei entgegengesetzt angebrachte Scheiben aus, um alle Richtungen abzudecken. Um das Einfädeln zu erleichtern, ist eine konische Vertiefung auf der Seite, von der der Draht eingefädelt wird, angebracht. Bei der hier gezeigten Version ist

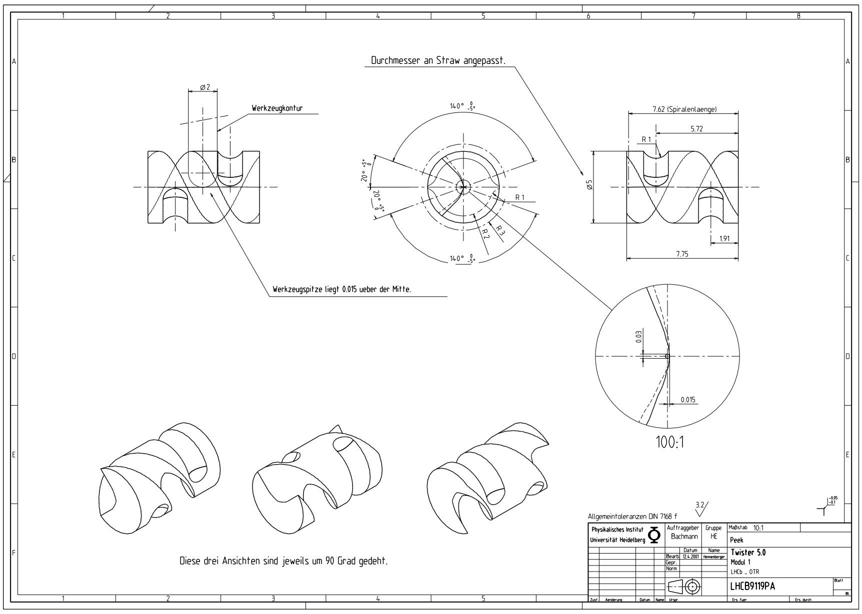


Abbildung 2.9: Konstruktionszeichnung eines Nikhef-Twisters. Die beiden zusätzlichen Rillen dienen zur Befestigung des Twisters im Straw durch Eindrücken der Strawwand.

der Ausschnitt verkleinert, um ein Ausweichen des Drahtes in der offenen Richtung zu begrenzen, da dieser Twister einzeln in den geplanten Kämmen zum Einsatz kommen sollte.
Nachdem aber mit dem Nikhef-Twister ein funktionierendes Design zur Verfügung stand, wurde darauf verzichtet, diese Kreisausschnitt-“Twister” zu bauen. Allerdings gibt es mittlerweile ein Design aus Krakau, welches dem oben vorgestellten stark ähnelt: ein Zylinder, der von beiden Seiten entgegengesetzt V-förmig eingeschnitten ist, mit einer schrägen Bohrung, welche die beiden V's miteinander verbindet (siehe Abb. 2.11). Leider ist die Fertigung dieses Twisters relativ kompliziert, da die Bohrung nachträglich durchgeführt werden muß. Eine Variation dieser Idee, die im Spritzgußverfahren fertigbar ist, wird im Moment in Nikhef, Amsterdam untersucht und ist in Abb. 2.12 dargestellt. Allerdings könnte hier der große offene Zwischenraum ein Problem darstellen, da hier Gasverstärkung in einem nicht definierten Umfeld stattfinden kann.

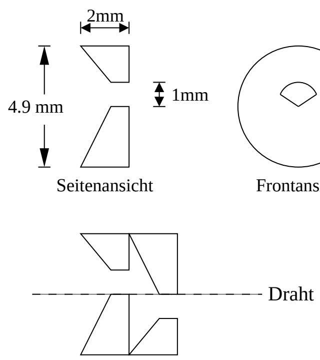


Abbildung 2.10: Drahtpositionierung mittels Kreisausschnitt-Twister

### 2.1.6 Gaszuführung

Eine gute und definierte Gaszuführung ist notwendig, um bei der ersten Inbetriebnahme des Detektors zu garantieren, daß jeder Straw und auch alle Zwischenräume mit Zählgas gespült werden, da sonst Reste von $O_2$ und Wasser im Detektor verbleiben und den Betrieb stören könnten. Außerdem ist ein stetiger Gasfluß durch alle Straws wichtig, um Alterungseffekte zu vermeiden oder zumindest zu verlangsamen.
Auch zu der Art, wie die Straws und das Modul mit Gas versorgt werden sollen, gab es mehrere Vorschläge. Das allererste Design hielt sich eng an den HERA-b-Straw-Entwurf: ein Gaskreislauf durch die Straws, allerdings mit dem Unterschied, daß das Gas über eine Endkappe an alle Straws eines Moduls verteilt wird, anstatt wie im HERA-b-Design jeden Straw einzeln per Röhrchen zu versorgen. Im Laufe der Zeit stellte sich aber heraus, daß die Straws für diesen Aufbau nicht gasdicht genug waren, daher der Vorschlag, die Straws innen mit dem Zählgas und außen mit Argon zu spülen. Dies hätte aber den Nachteil, daß zwei Gaskreisläufe mit verschiedenen Gasen benötigt würden; es wäre einfacher, sowohl innen als auch außen dasselben Gas zu verwenden.

Nun lag es nahe zu versuchen, nur einen Gaskreislauf zu benutzen. Ein Vorschlag,

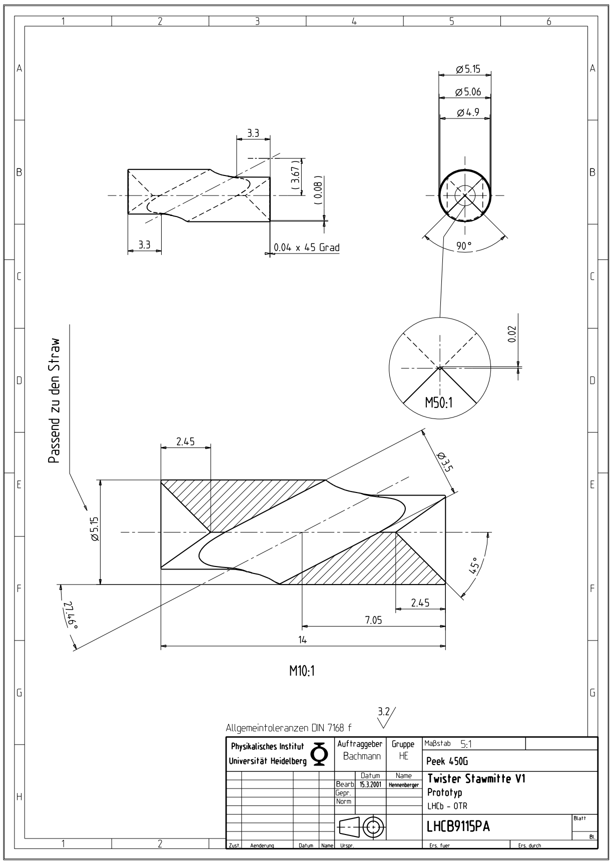


Abbildung 2.11: Konstruktionszeichnung eines Doppel-V-Twister (Entwurf von Krakau)

ursprünglich vom Nikhef Institut, Amsterdam stammend, der dies ermöglicht, ist in Abb. 2.13 dargestellt. Dort wird das Gas durch die Endkappen von beiden Seiten in die Straws geleitet, fließt an der offenen Drahttrennung in das Spülvolumen und verläßt das Modul wieder in den Endkappen. Während dieses Design den Vorteil hat, daß nur ein Gaskreislauf nötig ist, und trotzdem die Gasundichtigkeit der Straws keine Rolle spielt, ist es nicht möglich, nachträglich durch eine Analyse der Gaszusammensetzung festzustellen, ob eine mögliche Verunreinigung des Gases im Straw oder im Spülvolumen geschehen ist. Ein Entwurf, der diese Möglichkeit bietet, aber auch zwei getrennte Gaskreisläufe benötigt, ist im Kapitel 2.2 beschrieben.

### 2.1.7 Endkappe

Die Endkappe, die die Straws positionieren, Drähte halten, Spannung zuführen und Gas verteilen soll, ist eines der meistdiskutierten Bauteile. Repräsentativ für mehrere verworfene Vorschläge soll hier eine Alternative zum gewählten Endkappendesign vorgestellt werden, die den Vorzug hat, etwas kürzer zu sein, was besonders bei den im Magneten angeordneten Stationen wichtig ist. In Abb. 2.14 ist eine schematische Darstellung dieser Endkappe gegeben.

Kernstück dieses Designs ist der in der Mitte von Abb. 2.14 gezeigte Stift. Er erfüllt

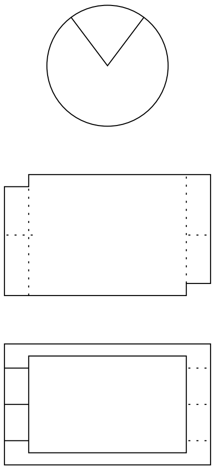


Abbildung 2.12: Version des Krakau-Twisters, entwickelt von Nikhef. Dieses Design ermöglicht die Fertigung im Spritzgußverfahren.

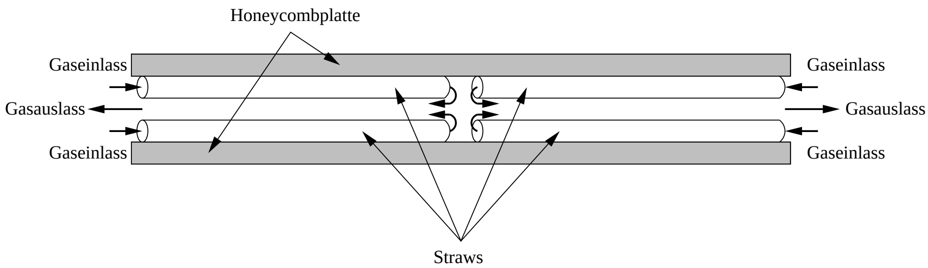


Abbildung 2.13: Gasführung mit nur einem Kreislauf, bei dem trotzdem die Straws und das Außenvolumen gespült werden.

zwei Funktionen: erstens dient er als Lötfahne, und zweitens als Hochspannungsstecker. Die Idee ist, die notwendige Lötstrecke (mindestens 7 mm, sicherheitshalber 10 mm) zum Teil nach außen zu verlegen, um so Raum zu gewinnen. Wenn die Stifte nicht als Stecker verwendet, sondern auf der in der Abbildung auch gezeigten Leiterplatte eingelötet werden, ist es nötig, zweimal auf den Stiften zu löten. Da die erste Lötung die Spannung des Drahtes halten muss, darf die zweite Lötung die erste nicht wieder aufschmelzen. Aus diesem Grund müssen zwei Lötzinne mit unterschiedlichen Schmelzpunkten verwendet werden. Zwei mögliche Zinne sind ERSIN 362 und 362 FLUX, beide von der Firma Multicore. Der Schmelzpunkt von 362 FLUX liegt bei $301°C$, der von ERSIN 362 bei $178°C$. Tests mit einem $25\mu$m dicken Wolframdraht unter einer Spannung von 80 g, der mit 362 FLUX befestigt war, zeigten, daß es möglich ist, direkt auf der Lötstelle mit ERSIN 362 zu löten, ohne daß der Draht sich löst.
Das Design, welches in den beiden an der Röntgenanlage verwendeten Modulen zur Anwendung kam, unterschied sich aus produktionstechnischen Gründen etwas von dem oben besprochenen, da die dort gezeigte Endkappe nur schwer im Spritzgußverfahren hätte produziert werden können. Diese Variante ist in Abb. 2.15 gezeigt.
Leider hat sich der hier besprochene Vorschlag nicht gegen den in Kapitel 2.2 beschriebenen durchsetzen können, hauptsächlich aufgrund der komplizierteren Fertigung

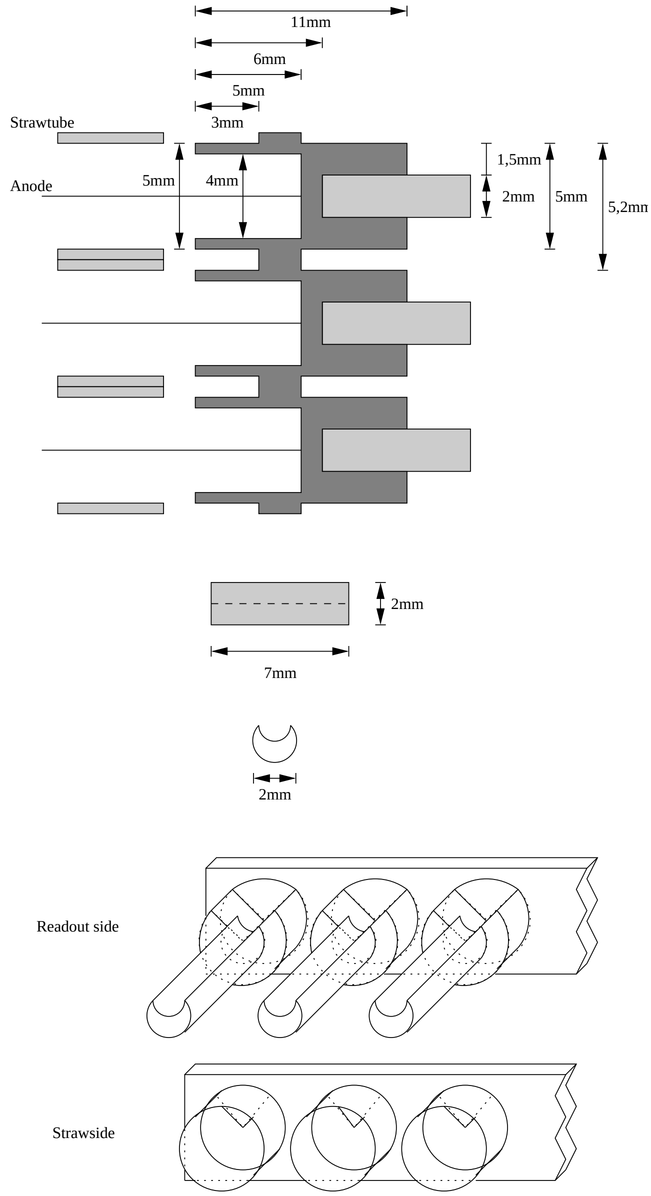


Abbildung 2.14: Alternative Endkappe; oben Risszeichnung, in der Mitte Lötstift, unten dreidimensionale Ansicht

durch das Löten auf Stiften statt auf Lötfahnen, was den nicht unerheblichen Raumgewinn durch eine kürzere Gesamtlänge aufwog.

## 2.2 Design eines Prototypen in Originalgröße

Der erste Prototyp in Originalgröße vereinigt die in Kap. 2.1 diskutierten Bauteile. Der wichtigste Bestandteil dieses Moduls ist die Endkappe, die in Abb. 2.16 dargestellt ist. Sie besteht aus einer "L"-förmigen Grundplatte mit 64 Bohrungen mit einem Durchmesser von 4.3 mm, in die Röhrchen eingeklebt werden, die die Straws halten. In diesem "L" befindet sich eine Platine, auf die die Drähte aufgelötet werden. Die

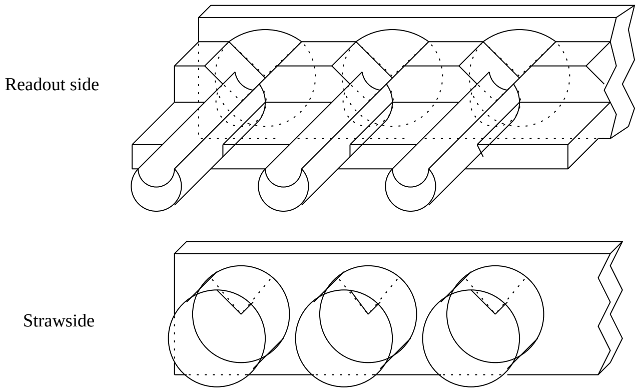


Abbildung 2.15: Variation der alternative Endkappe, in Röntgenmodulen umgesetzt

Verbindung der Drähte zur Elektronik wird durch auf die Platine aufgelötete Stecker gewährleistet. Um die Erdungsverbindung zur Innenseite zu gewährleisten, aber die Hochspannungssicherheit nicht zu gefährden, bestehen die Röhrchen, die in die Endkappe eingeklebt werden, aus zwei Teilen: einem aus ULTEM[4] gefertigten inneren und einem aus Aluminium bestehenden äußeren Teil. Das Aluminium sorgt für den elektrischen Kontakt zur Innenfläche des Straws, das ULTEM dafür, daß keine auf Erdpotential liegende Fläche in die Nähe des Drahtes gelangt. Zwei dieser Endkappen werden in “U”-Form zu einem Modul zusammengeklebt, und der noch offene Raum mit einer ebenfalls aus ULTEM gefertigten 6 mm dicken Platte gasdicht abgeschlossen, wie in Abb. 2.16 zu sehen. Diese Dicke ist notwendig, da alle zwischen den beiden Modulhälften wirkenden Kräfte durch die Klebungen an diesen Platten aufgenommen werden.
Das Zählgas wird über das Gasvolumen innerhalb der Endkappe an alle Straws eines Moduls gleichzeitig zugeführt; zu diesem Zweck sind sechs Öffnungen im “Boden” der Endkappe angebracht. Der Außenraum der Straws wird ebenfalls mit Zählgas gespült, um eine differenzierte Gasanalyse zum Nachweis von Verunreinigungen zu ermöglichen. Dieses Gas wird über dünne Röhrchen von der anderen Seite des Moduls durch die Endkappe in den Raum zwischen den Straws eingebracht. Beide Gaskreisläufe werden am anderen Ende des Moduls über eine identische Endkappe herausgeführt. In Abb. 2.17 ist eine Übersicht der Endkappe mit Gaszuführungen gezeigt.
Um die Produktion zu vereinfachen, soll die Drahttrennung in der Mitte nach demselben Design wie die Endkappe gefertigt werden, allerdings in “U”-Form. In Abb. 2.18 ist diese dargestellt. Damit nur eine Spritzgußform benötigt wird, werden alle Teile in dieser Art gefertigt, und von 2/3 aller Teile eine Seitenwand abgesägt.
Welche Art von Twistern verwendet werden soll, ist noch nicht endgültig entschieden. Eine (verkürzte) Gesamtansicht eines Moduls ist in Abb. 2.19 zu sehen.

Straws, Endkappen und Drahttrennung werden auf eine mit einer 25$\mu$m dicken Aluminiumfolie bespannten Honeycombplatte aufgeklebt. Wenn die Straws beim Kleben mit STYCAST fest auf die Aluminiumfolie gepresst werden, besteht ein guter elek-

[4]Polyetherimid, chemische Bezeichnung PEI. Unverstärktes amorphes Thermoplast, welches im Spritzgußverfahren benutzt werden kann

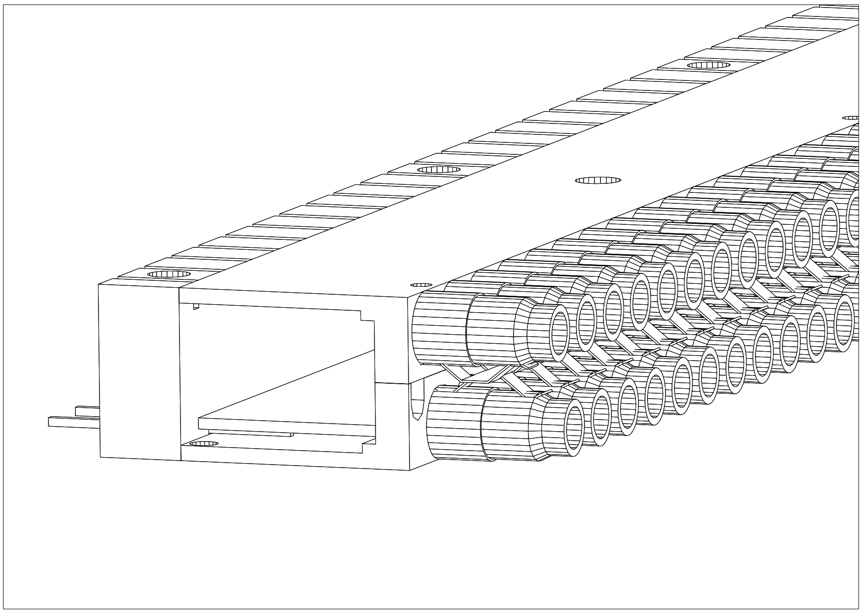

Abbildung 2.16: Detailansicht einer Endkappe. Zu sehen sind die Strawhülse, die dazwischenliegende Feder zur Erdung, die untere Leiterplatte mit Anschlüssen und der ULTEM-Abschluß.

trischer Kontakt zwischen der Folie und der Aluminiumschicht der Straws. Um den Kontakt zwischen den beiden Lagen herzustellen, wird eine speziell angefertigte Feder zwischen die Röhrchen der Endkappen und der Drahttrennung gelegt. Diese Feder ist in Abb. 2.20 zu sehen. Ursprünglich sollte der Erdkontakt über Schrauben durch die Honeycombplatte nach Außen zur Elektronik geführt werden, es ist jedoch einfacher und kürzer, Teile der Erdfolie unter den Endkappen hindurch in den Raum, der für die Elektronik vorgesehen ist, hindurchzuführen. Der größte Teil der Endkappe muß allerdings direkt auf die Honeycombplatte geklebt werden, da diese Stelle alle zwischen den beiden Lagen eines Moduls auftretenden Kräften aufnehmen muß und STYCAST auf Aluminium nur sehr schlecht haftet.
Ein Problem dieses Designs ist in Abb. 2.21 zu sehen. Das Modul besteht aus ungefähr 2000 Einzelteilen, was den Zusammenbau in die Länge zieht. Aus diesem Grund wird es noch weiter optimiert. Eine Möglichkeit, den Aufbau zu vereinfachen, besteht darin, auf eine Kontaktierung der Strawinnenseiten zu verzichten. Dadurch wäre es nicht mehr notwendig, die Strawhülsen aus zwei Teilen zu fertigen. Um den Kontakt zwischen Kapton-XC und Aluminium zu gewährleisten, wird ein leitfähiger Kleber zur Fertigung der Straws verwendet werden.

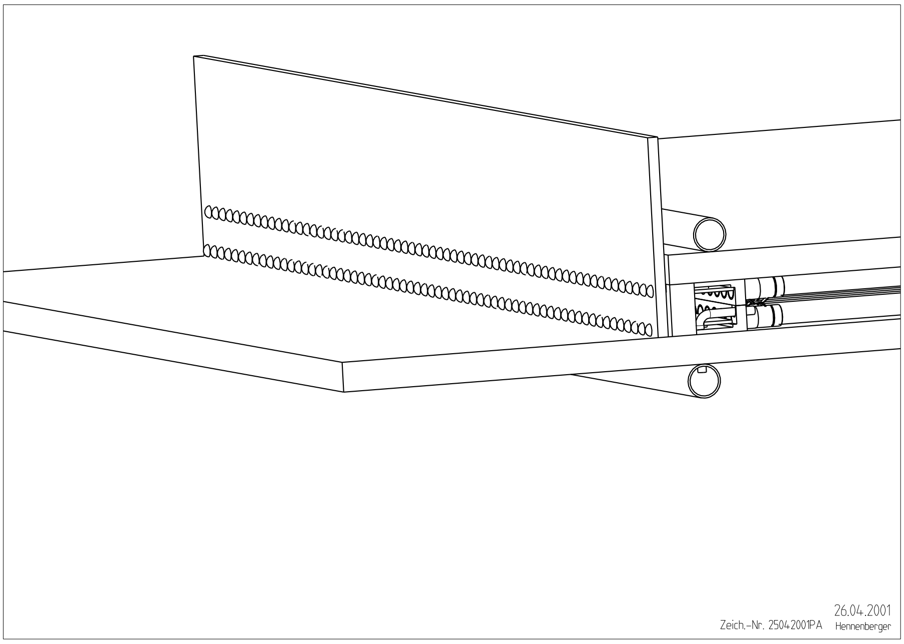


Abbildung 2.17: Übersicht einer Endkappe mit tragender Struktur und Gaszufuhr

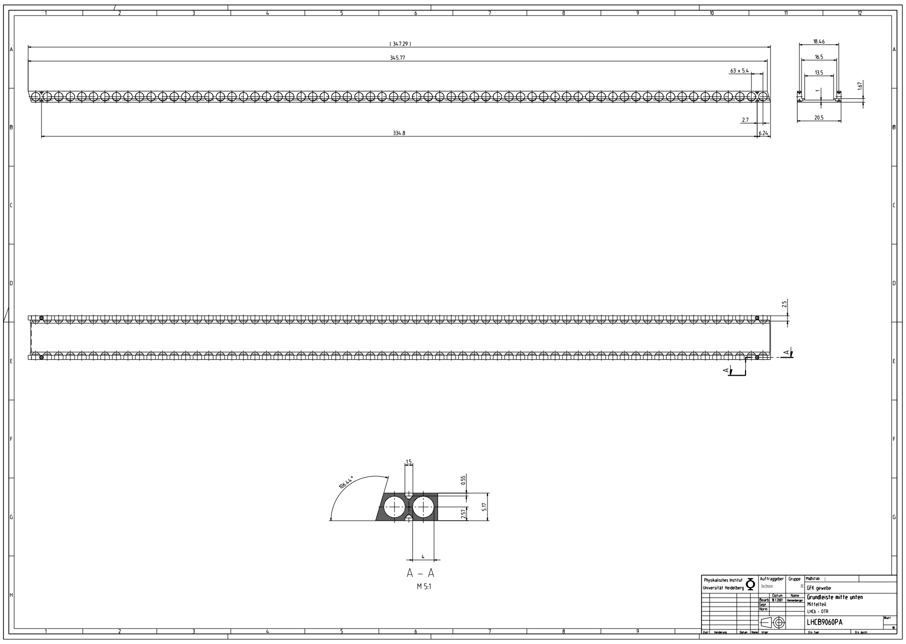


Abbildung 2.18: Konstruktionszeichnung des Mittelstücks in U-Form; dieses entspricht der Endkappe bis auf die zusätzliche Seitenwand.

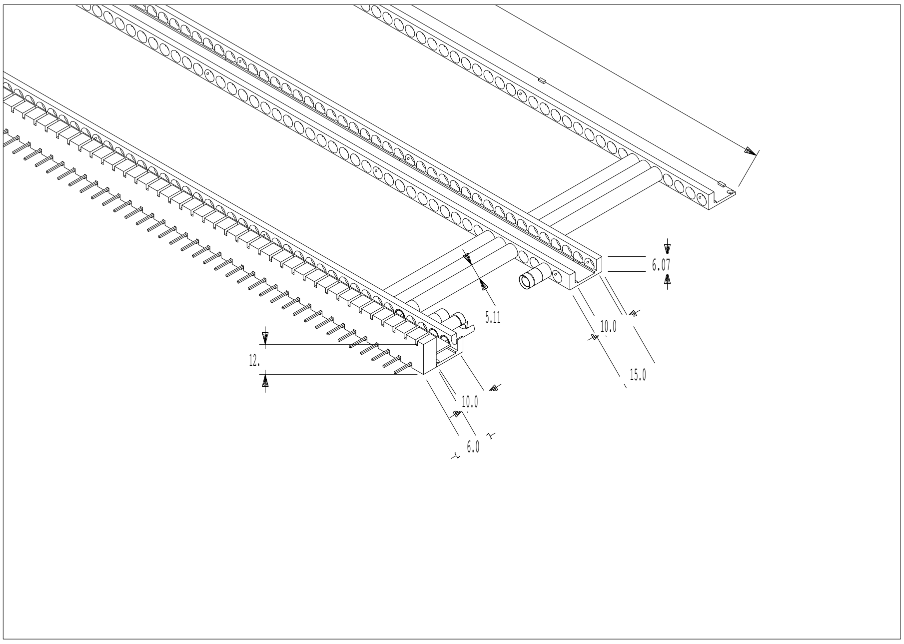


Abbildung 2.19: Gesamtansicht einer Modulhälfte ohne Grundplatte in verkürzter Form. Dargestellt sind beide Endkappen, die Drahttrennung in der Mitte und die Leiterplatte mit Anschlüssen in einer Endkappe

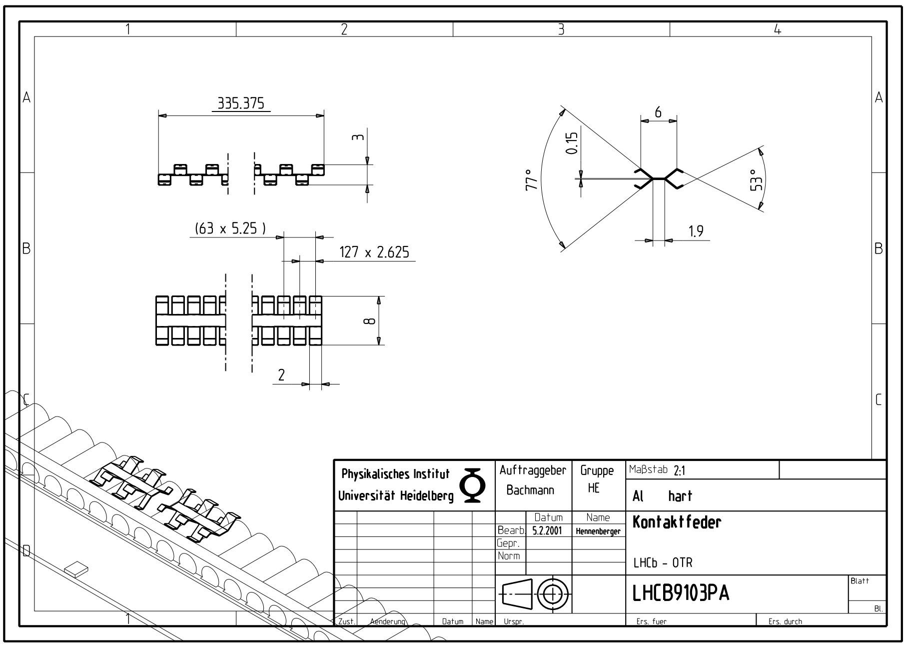


Abbildung 2.20: Zum Herstellen eines Erdkontaktes zwischen den Straws der beiden Lagen eines Moduls benötigte Feder aus hartem Aluminium

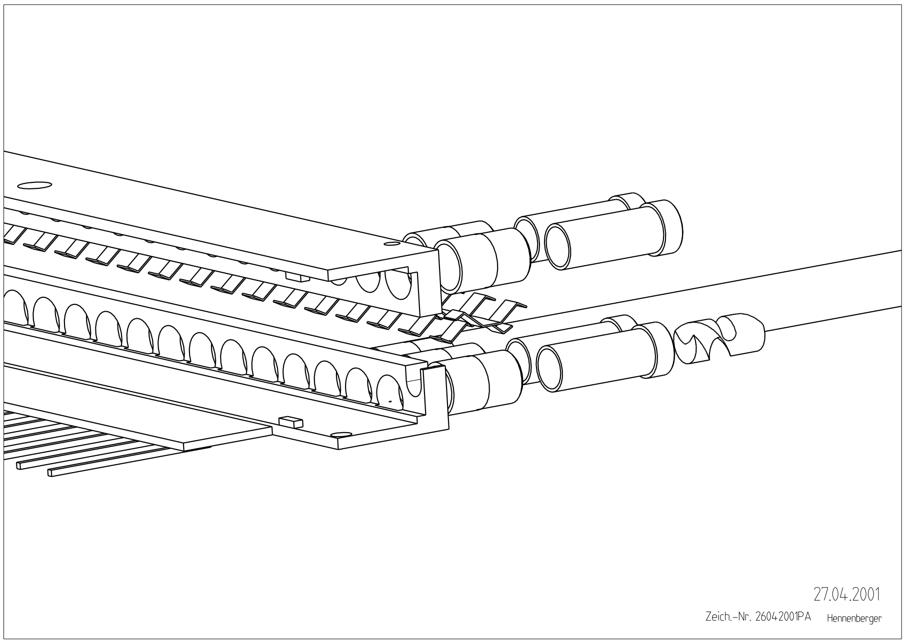


Abbildung 2.21: Darstellung der zum Zusammenbau einer Endkappe benötigten Einzelteile

## 2.3 Zusammenfassung

Zu dem Moduldesign gab es sehr viele Ideen und Vorschläge, die hier nicht alle gezeigt werden konnten. Die meisten wurden wieder verworfen, einige weiterentwickelt und wenige akzeptiert, bis man bei dem in Kap. 2.2 vorgestellten ankam. Dieser Prozeß ist immer noch nicht beendet. Wie oben beschrieben ist dieses Modul noch zu aufwendig, um es in großer Anzahl herzustellen. Außerdem soll nur ein Design im ganzen äußeren Spurkammersystem zur Anwendung kommen, daher werden die Vorschläge aus Nikhef und Heidelberg in naher Zukunft zu einem konvergieren. Die Entscheidung, welcher Twister verwendet wird, wird ebenfalls im Laufe der nächsten Monate getroffen werden. Die Kriterien dabei sind die Möglichkeit, eine Spritzgußtechnik zur Produktion verwenden zu können, und ob der Draht mit Druckluft durch mehrere Twister geblasen werden kann.

# Kapitel 3

# Erste Versuchsaufbauten

Zu Beginn dieser Diplomarbeit gab es in Heidelberg noch keine Erfahrung mit dem Bau von Strawkammern, daher war der erste Aufbau hauptsächlich dazu gedacht, sich mit der Konstruktion und dem Betrieb von Straws vertraut zu machen.

Dieser erste Strawaufbau bestand aus zwei einzelnen Straws, beide 50 cm lang. Zu

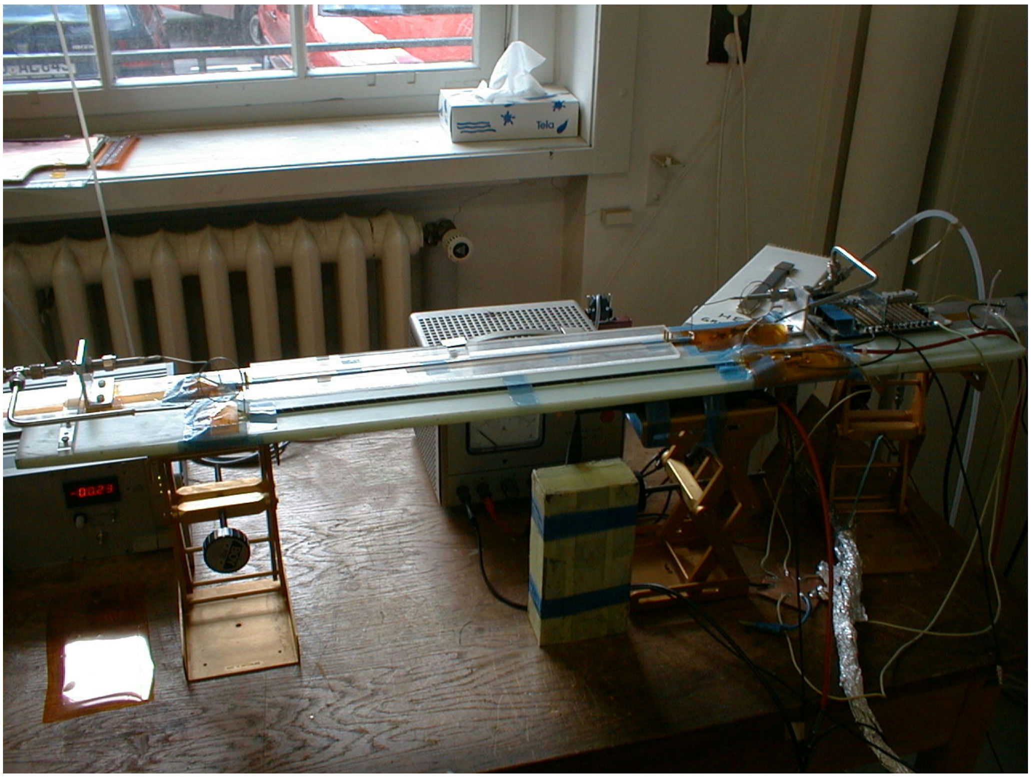

Abbildung 3.1: Foto des ersten Aufbaus mit zwei einzelnen Straws

diesem Zweck wurden Restbestände aus dem HERA-b Strawprojekt verwendet. Im Gegensatz zu dem aktuellen LHC-b-Design mit einer Endkappe für 128 Straws gab es im HERA-b-Design eine Endkappe mit eigener Gasversorgung pro Straw. Während diese Anordnung im fertigen Detektor zu aufwendig wäre, war sie ideal für unsere beiden ersten Teststraws. Eine Detailzeichnung dieser Endkappe ist in Abb. 3.2 zu sehen, während Abb. 3.1 den Aufbau zeigt.

Als Verstärker wurde der im Physikalischen Institut Heidelberg entwickelte VV50

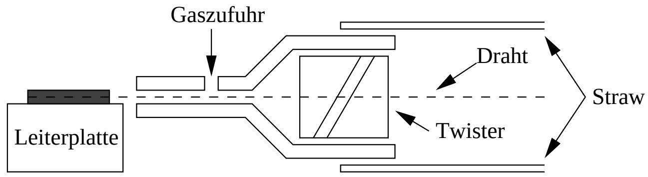


Abbildung 3.2: Risszeichnung der HERA-B Endkappe

verwendet. Der VV50 ist ein integrierender Vorverstärker mit einer Verstärkung von 1.2 mV/fC. Der gesamte Aufbau ist in Abb. 3.3 dargestellt. Wie dort zu sehen ist, war ein Ende über den Verstärker gegen Erde abgeschlossen, während das andere offen gelassen wurde. Dies hatte zwei Gründe:
Zum ersten wird es im fertigen Detektor nicht möglich sein, das dem Verstärker entgegengesetzte Ende gegen Erde abzuschließen, da sich dieses Ende wegen der Drahttrennung in der mittleren Gegend des Detektors, in der die stärkste Strahlung einfällt, befindet. Ein Abschluß würde einen gewissen Platz brauchen, der an Detektorvolumen verloren geht, und außerdem Material einfügen, was die Dicke des Moduls in Strahlungslängen vergrößern würde. Zum zweiten wird ein Signal, welches nahe des fernen Endes erzeugt wird, durch die Dämpfung im Straw abgeschwächt, bevor es am Verstärker ankommt, was die Empfindlichkeit reduziert. Da sich eine auf dem Draht einfallende Ladung zu gleichen Teilen in beide Richtungen ausbreitet, würde die Hälfte des Signals, falls nun der Straw gegen Erde abgeschlossen wäre, über den Abschluß abfließen und verloren gehen. Wenn das ferne Ende offen bleibt, addieren sich der dort reflektierte und der direkt zum Verstärker laufende Puls (siehe Abb. 3.8), so daß der Effekt der Dämpfung abgeschwächt wird.

Die ersten Tests wurden mit einer Fe-55 Quelle durchgeführt. Der Vorteil einer Fe-

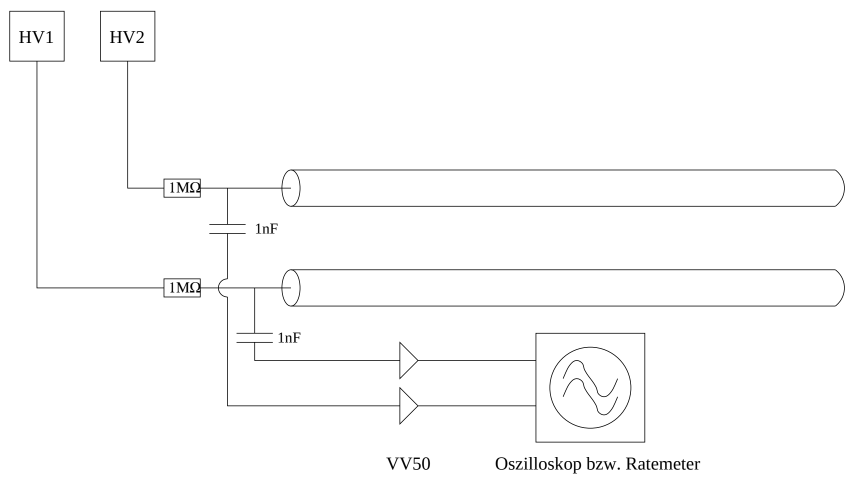


Abbildung 3.3: Skizze des ersten Straw-Aufbaus aus zwei Straws mit eigener Hochspannungsversorgung

55-Quelle liegt darin, daß sie monoenergetische Gammastrahlung einer Energie von 5.9

keV emittiert. Daher ist die Breite des gemessenen Spektrums nur bestimmt durch die Energieauflösung des Detektors. Ein Energiespektrum dieser Quelle ist in Abb. 3.4 und 3.5 zu sehen, einmal mit $Ar/CO_2$ 70/30 und einmal mit $Ar/CO_2/CF_4$ 65/5/30 als Zählgas. Hierbei sieht man deutlich den Unterschied in der Energieauflösung der beiden Gase. Das in Abb. 3.4 zu sehende kleinere Maximum wird als Argon-Escape-Peak bezeichnet. Wenn die einfallende Gammastrahlung ein Elektron aus der innersten Hülle des Argonatoms löst, fällt ein Elektron aus der zweiten Schale in die freigewordene Lücke. Die dabei freiwerdende Energie wird als Photon einer Energie von 3 keV emittiert und kann den Straw undetektiert verlassen. Aus diesem Grund liegt der Escape-Peak bei der halben Pulshöhe des Eisenmaximums.

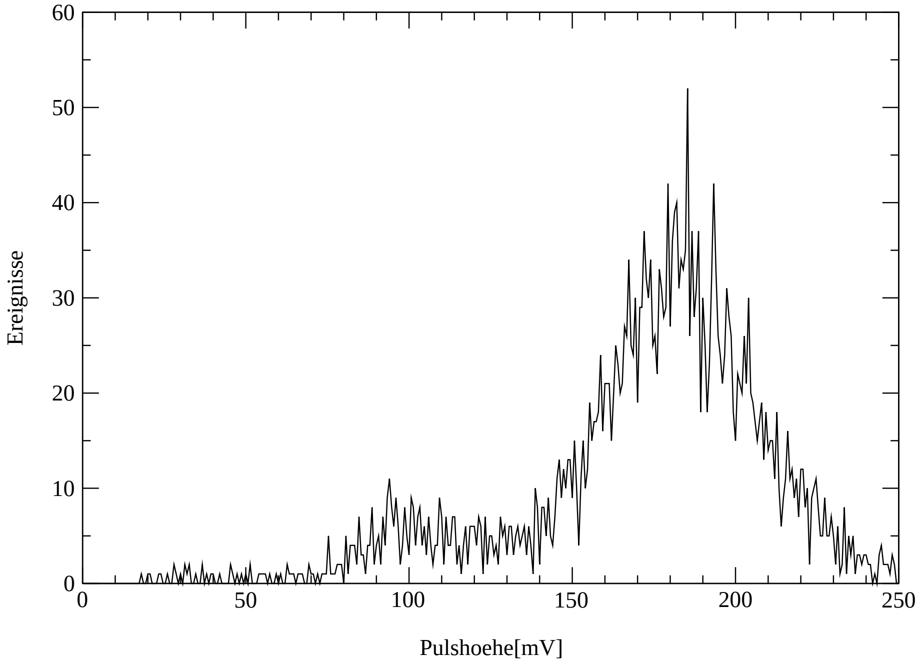


Abbildung 3.4: Spektrum der Fe-55-Quelle, aufgenommen mit einem an einen VV50 angeschlossenen und mit $Ar/CO_2$ 70/30 gespülten Straw

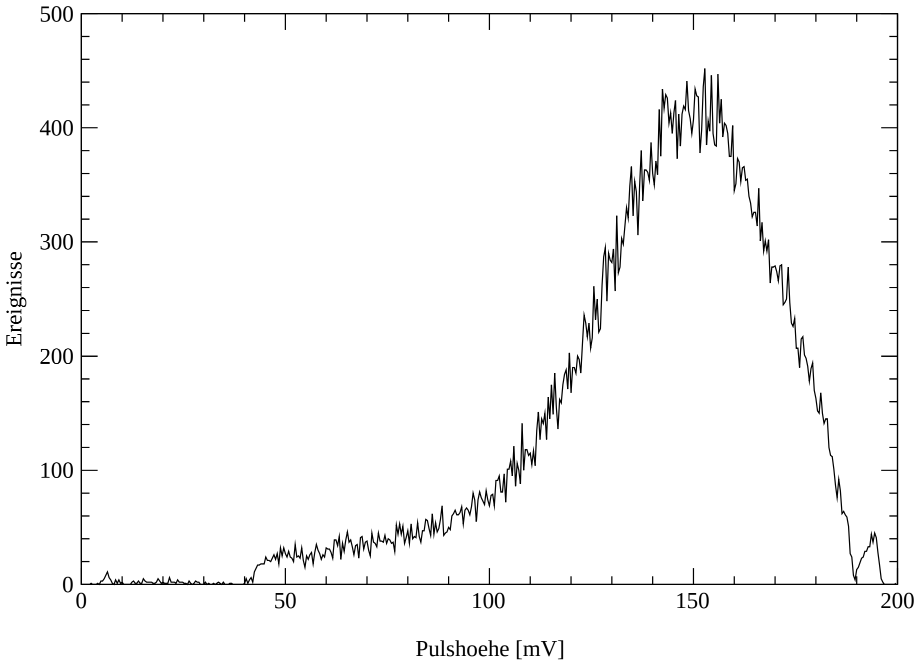


Abbildung 3.5: Spektrum der Fe-55-Quelle, aufgenommen mit einem an einen VV50 angeschlossenen und mit Ar/$CO_2$/$CF_4$ 65/5/30 gespülten Straw

## 3.1 Ausbreitungsgeschwindigkeit der Signale

Um die Eigenschaften der Straws besser kennenzulernen, wurde für die ersten Messungen auf einen Vorverstärker verzichtet und der Strawausgang direkt mit dem Eingang des Oszilloskops verbunden, so daß die zeitliche Struktur des Signals sichtbar wurde. Durch diese direkte Messung des Strawsignals war es möglich, durch den Zeitunterschied zwischen Original- und am offenen Ende reflektiertem Puls die Signalpropagationsgeschwindigkeit im Straw, also die Geschwindigkeit, mit der sich ein Signal entlang des Straws ausbreitet, zu messen. Aus Gründen der Meßgenauigkeit wurde diese Messung mit dem zweiten Röntgenanlagenmodul wiederholt.

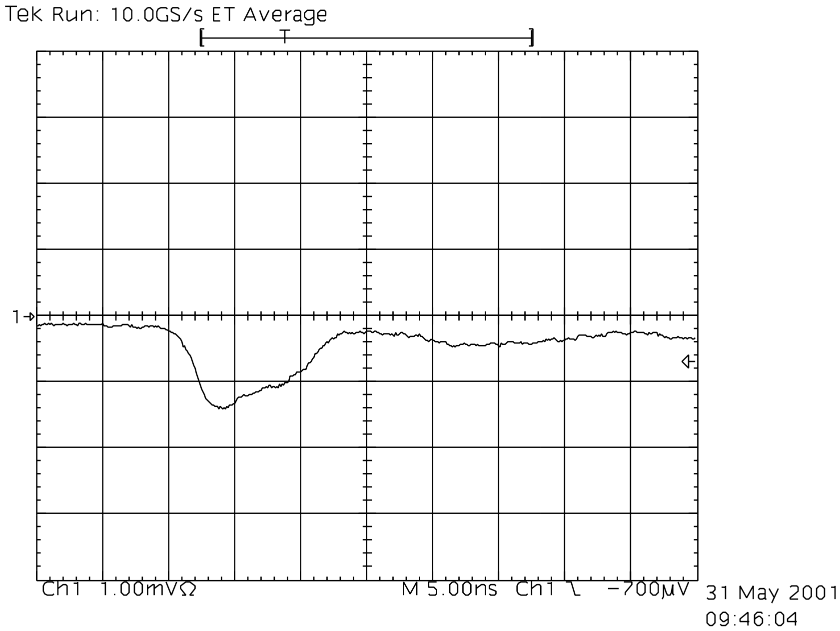


Abbildung 3.6: Puls im Straw ohne Vorverstärker, Quelle 1 cm vom offenen Ende entfernt. Es wurde über 1000 Pulse gemittelt.

Wie in Abb. 3.8 zu sehen ist, betrug der Laufzeitunterschied zwischen dem Original- und dem reflektierten Puls 7.5 ns. Da der Originalpuls direkt zum Vorverstärker lief, und der reflektierte Puls zweimal den Abstand der Quellenposition vom offenen Ende zusätzlich zurücklegen mußte, beträgt die Propagationsgeschwindigkeit der Pulse im Straw $v = \frac{\Delta t}{\Delta x} = \frac{7.5\text{ns}}{2\times 107\text{cm}} = 3.50 \pm 0.23$ ns/m.
Dies entspricht $95.3 \pm 6.4\%$ der Lichtgeschwindigkeit. Zur Verifizierung ist in Abb. 3.7 die Pulsform, die sich aus einer Quellenposition in der Mitte des Straws ergibt, dargestellt. Aus dem dort gemessenen Wert von 4.5 ns folgt eine Geschwindigkeit von $v = \frac{\Delta t}{\Delta x} = \frac{4.5\text{ns}}{2\times 61\text{cm}} = 3.69 \pm 0.41$ ns/m. In Abb. 3.6 ist die Pulsform bei Bestrahlung nahe des offenen Endes gezeigt, in der kein zweiter Puls mehr zu sehen ist, was zeigt, daß seine Ursache in einer Reflektion am offenen Ende liegt.

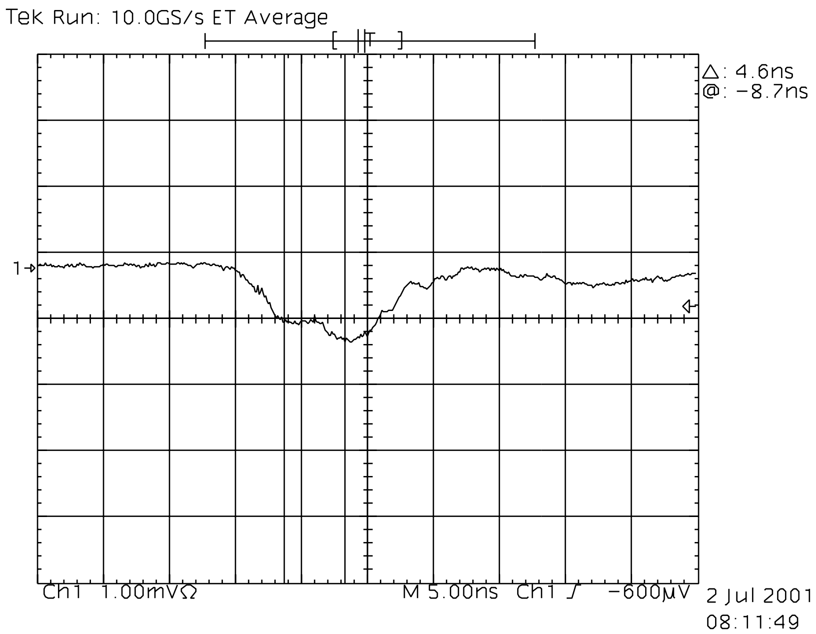


Abbildung 3.7: Puls im Straw ohne Vorverstärker, Quelle 61 cm vom offenen Ende entfernt. Es wurde über 1000 Pulse gemittelt.

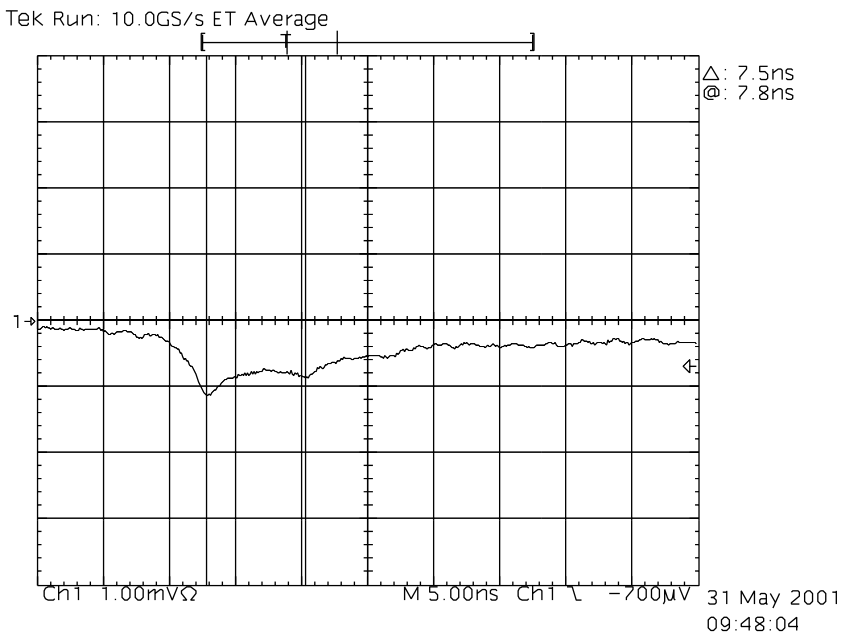


Abbildung 3.8: Puls im Straw ohne Vorverstärker, Quelle 107 cm vom offenen Ende entfernt. Es wurde über 1000 Pulse gemittelt.

## 3.2 Plateaumessungen

Eine sehr wichtige Eigenschaft eines Gases in einem Proportionalzähler ist das sogenannte Plateau, also der Bereich, in dem die Zählrate und damit die Effizienz des Detektors unabhängig von einer Variation der angelegten Spannung ist und auch mit der Rate an einfallenden Teilchen übereinstimmt. Die Lage und Länge dieses Plateaus bestimmt den Betriebspunkt, die angelegte Spannung im Detektor. Nach Möglichkeit wählt man dafür einen Punkt nahe des Anfangs des Plateaus, um die erzeugte Ladung und damit eventuell auftretende Alterungseffekte zu minimieren, aber weit genug vom Anfang entfernt, daß Schwankungen von Druck und Temperatur die Effizienz nicht mehr beeinflussen.
Beim Hochfahren der Spannung ist das elektrische Driftfeld ab einem vom Gas abhängigen Punkt hoch genug, daß die durch die Teilchen mit der größten Primärionisation erzeugten Elektronen eine nachweisbare Lawine erzeugen; die Zählrate wird größer Null. Beim weiteren Steigern der Spannung werden Teilchen mit einer immer kleineren Primärionisation nachgewiesen, bis ab einem bestimmten Punkt alle einfallenden Teilchen einen Zählpuls erzeugen. Dieser Punkt ist der Anfang des Plateaus. Auch bei monoenergetischer Strahlung hat der Anstieg bis zum Plateau noch eine endliche Steigung, da im Gasverstärkungsprozeß statistische Schwankungen auftreten. Wenn die Spannung noch weiter erhöht wird, steigt die in einer Lawine enthaltene Ladung (durch eine höhere Gasverstärkung) und damit die Pulshöhe an, die Zählrate aber bleibt konstant. Erst wenn das elektrische Feld zu hoch wird, kann eine zweite Lawine nach dem Abklingen der ersten entstehen, so daß ein einzelnes in den Detektor eindringendes Teilchen zwei Zählpulse auslöst; die Zählrate steigt wieder an. Dieser Punkt definiert das Ende des Plateaus. Ein solcher Doppelpuls ist in Abb. 3.9 gezeigt, während Abb. 3.10 einen normalen Puls zeigt. Die Ursache dieser Nachpulse liegt in Photonen, die durch an der Kathode neutralisierten Ionen erzeugt werden. Der verwendete Verstärker VV50 hat einen normalen und einen invertierten Ausgang. Da bei der Messung des Doppelpulses der normale Ausgang zum Triggern verwendet wurde, ist in der Abbildung der invertierte Ausgang gezeigt.

### 3.2.1 Messung mit Eisenquelle

Für die Messungen des Plateaus war der Vorverstärker wieder an den Straw angeschlossen. Gemessen wurde die Zählrate in den Straws in Abhängigkeit von der am Straw angelegten Hochspannung bei variabler Triggerschwelle am Diskriminator. Die Messung wurde mit zwei verschiedenen Gasen durchgeführt, einmal mit dem Outer-Tracker-Gas von HERA-b, einer Mischung aus Argon, $CO_2$ und $CF_4$ im Verhältnis 65/5/30, und mit einer Mischung aus 70% Argon und 30% $CO_2$. Aus den Plateaukurven ist zu entnehmen, daß die Wahl der Diskriminatorschwelle nur den Beginn, nicht aber das Ende des Plateaus beeinflußt. Die Schwankungen am Plateauende bei der Messung mit $Ar/CO_2$ sind durch Messungenauigkeiten zu erklären. Dieses Ergebnis war zu erwarten, da eine höhere Triggerschwelle die Ladung erhöht, die in einer durch ein einlaufendes Teilchen hervorgerufenen Lawine erzeugt werden muß.
In Tabelle 3.1 sind die Ergebnisse der Messung zusammengefaßt.

| Fe-55 in $Ar/CO_2$ (70/30) | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Schwelle [mV] | Plateaubeginn [V] | Plateauende [V] | Plateaulänge [V] | Plateaumitte [V] |
| 30 | 1345 | 1755 | 410 | 1550 |
| 60 | 1410 | 1745 | 335 | 1620 |
| 90 | 1450 | 1740 | 290 | 1595 |
| 120 | 1475 | 1710 | 235 | 1595 |
| 150 | 1495 | 1730 | 235 | 1615 |
| 180 | 1515 | 1750 | 235 | 1635 |
| Fe-55 in $Ar/CO_2/CF_4$ (65/5/30) | | | | |
| Schwelle [mV] | Plateaubeginn [V] | Plateauende [V] | Plateaulänge [V] | Plateaumitte [V] |
| 30 | 1510 | 1895 | 385 | 1705 |
| 60 | 1585 | 1895 | 310 | 1740 |
| 90 | 1625 | 1895 | 270 | 1760 |
| 120 | 1655 | 1895 | 240 | 1775 |
| 150 | 1680 | 1895 | 215 | 1790 |
| 180 | 1695 | 1895 | 200 | 1795 |

Tabelle 3.1: Ergebnisse der Plateaumessungen mit einer Eisenquelle in $Ar/CO_2$ und $Ar/CO_2/CF_4$. Hierbei sind Plateauanfang und Plateauende definiert als 90% bzw. 110% der Zählrate in der Mitte des Plateaus.

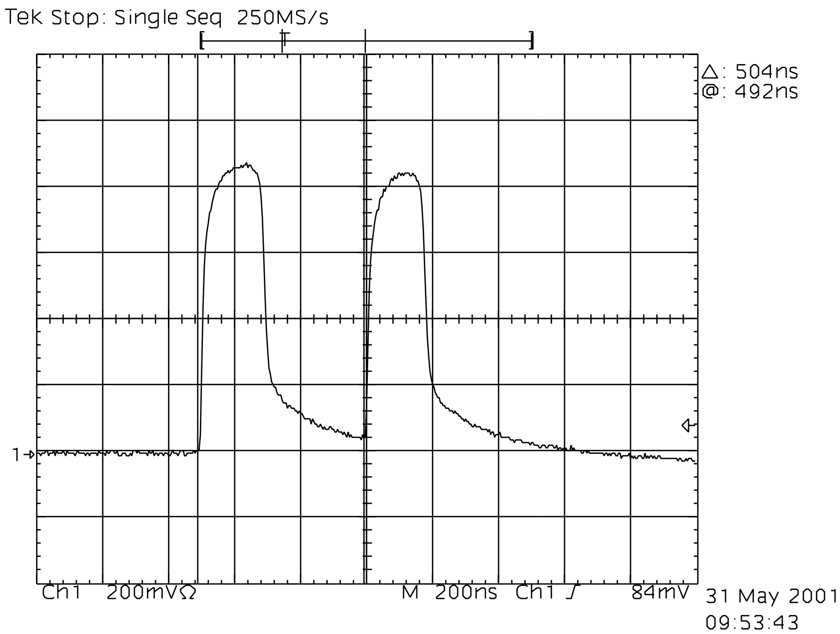


Abbildung 3.9: Typischer Nachpuls, welcher am Plateauende die Zählrate wieder ansteigen läßt; die Pulsform wird vom invertierten Ausgang des VV50, der hier bereits in Sättigung arbeitet, erzeugt.

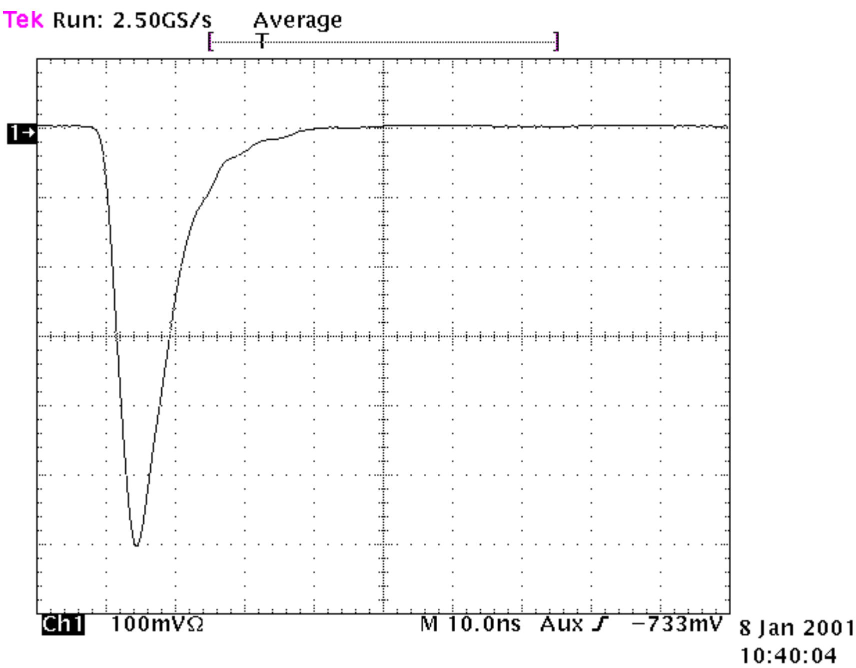


Abbildung 3.10: Normales Strawsignal, gemessen mit dem nichtinvertierten Ausgang des VV50

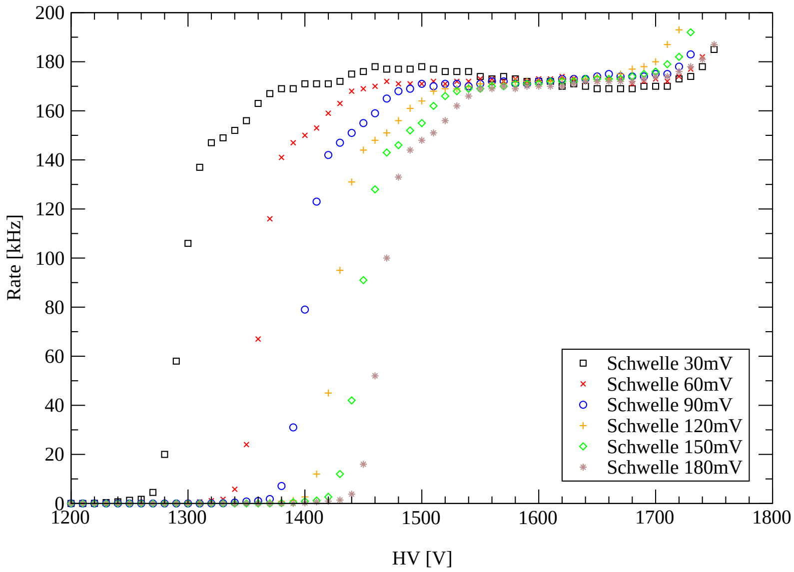


Abbildung 3.11: Plateaukurven von Ar/$CO_2$ bei verschiedenen Diskriminatorschwellen, gemessen mit einer Eisenquelle

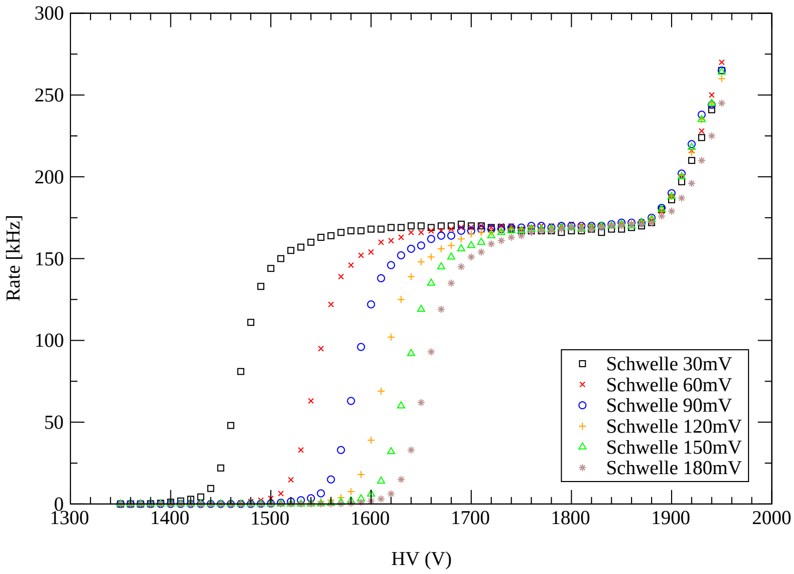


Abbildung 3.12: Plateaukurven von Ar/$CO_2$/$CF_4$ bei verschiedenen Diskriminatorschwellen, gemessen mit einer Eisenquelle

### 3.2.2 Messung mit Rutheniumquelle

Da die Gammastrahlen der Fe-55-Quelle eine sehr hohe Primärionisation erzeugen (ca. 220 $e^-$), ist sie keine gute Simulation der LHC-b-Bedingungen, in denen minimal ionisierende Teilchen (MIP's, 20 Primärelektronen) vorherrschen. Ein weiterer Unterschied zwischen Gamma's und MIP's ist, daß Gammateilchen die Primärionisation in einem räumlich kleinen Gebiet deponieren, während MIP's die Ionisation entlang ihrer Spur im ganzen Straw verteilen. Aufgrund der geringeren Primärionisation ist auch die Plateaukurve zu höheren Spannungen hin verschoben, da eine höhere Gasverstärkung nötig ist, um aus der kleineren Anzahl Primärelektronen eine genügend große Lawine zu erzeugen. Zur Messung der Plateaukurve mit minimal ionisierenden Teilchen wurde die Eisenquelle durch eine Rutheniumquelle ersetzt. Ruthenium ist sowohl Beta- als auch Gammastrahler. Die Betastrahlung wurde dazu benutzt, MIP's zu simulieren. Die niederenergetische Gammastrahlung wurde durch eine Koinzidenzschaltung mit zwei Szintillatoren eliminiert, da nur die Elektronen in der Lage waren, sowohl im Straw als auch in beiden Szintillatoren ein Signal auszulösen. Eine Skizze des Aufbaus ist in Abb. 3.13 zu sehen. Das Ergebnis dieser Messung ist in Abb. 3.14 und Tabelle

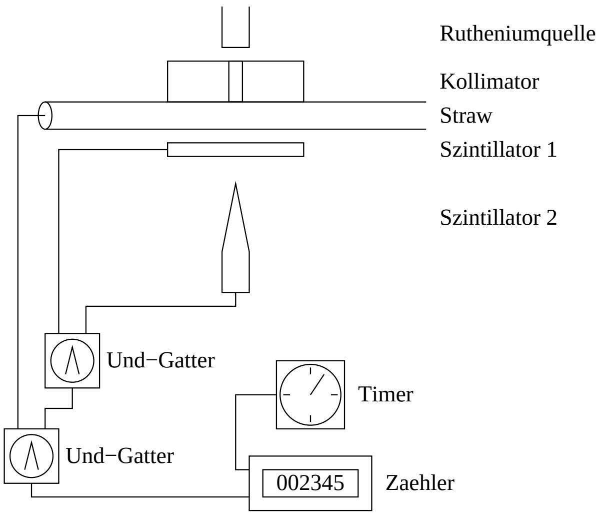


Abbildung 3.13: Messaufbau zur Plateaumessung mit Hilfe einer Rutheniumquelle. Die Szintillatoren wurden verwendet, um die niederenergetische Gammastrahlung der Rutheniumquelle zu eliminieren.

3.2 wiedergegeben. Im Gegensatz zu der Fe-55 Messung ist hier das Plateauende nicht durch einen Anstieg der Zählrate aufgrund von Nachpulsen definiert. Da die Strawpulse bei der Rutheniummessung über eine Koinzidenzschaltung mit den Szintillatorsignalen korreliert waren, blieb die Zählrate trotz auftretender Nachpulse konstant. Aus diesem Grund wurde auch der durch die Straws fließende Strom gemessen, da dieser durch die am Plateauende zusätzlich auftretenden Nachpulse rapide anstieg.

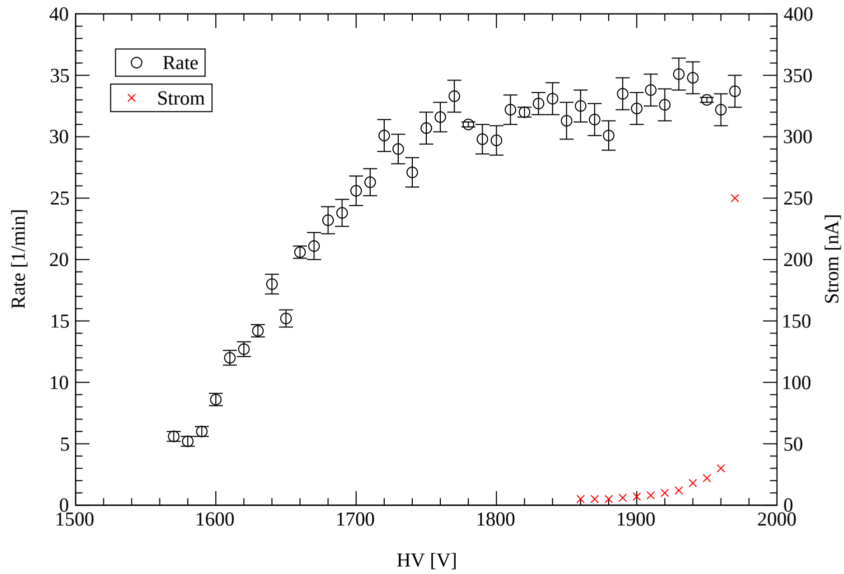


Abbildung 3.14: Plateaukurven von $Ar/CO_2/CF_4$ 65/5/30, gemessen mit Hilfe einer Rutheniumquelle. Die obere Kurve stellt die Zählrate dar, die untere den durch die Straws fließenden Strom

| Ruthenium in $Ar/CO_2/CF_4$ | | | |
|---|---|---|---|
| Plateaubeginn [V] | Plateauende [V] | Plateaulänge [V] | Plateaumitte [V] |
| 1730 | 1920 | 190 | 1825 |

Tabelle 3.2: Ergebnisse der Plateaumessungen mit einer Rutheniumquelle in $Ar/CO_2/CF_4$. Hierbei ist der Plateaubeginn definiert als 90% der Zählrate in der Mitte des Plateaus, und das Plateauende als Verdoppelung des Stroms.

## 3.3 Einfluß des Twisters

Eine Messung, die zwar nicht mit den ersten Strawaufbauten, sondern mit einem Modul für die Röntgenanlage vorgenommen wurde, aber trotzdem in den Themenkreis dieses Kapitels gehört, ist die Messung des Einflusses des Twisters auf die Detektionseffizienz. Zu diesem Zweck wurde eine Fe-55-Quelle mit einem 1 mm schmalen Kollimator entlang des Straws über einen Twister verschoben und der durch die Straws fließende Strom gemessen. Der dabei verwendete Twister war ein Nikhef-Twister (siehe Abb. 2.9) mit einer Länge von 5 mm. Dabei wurde $Ar/CO_2$ 70/30 als Zählgas verwendet. In Abb. 3.15 ist deutlich zu sehen, daß die Effizienz in der Nähe des Twisters stark abnimmt, und zwar in größerer Entfernung als durch die Breite des Kollimators bedingt. In Abb. 3.16 ist die Meßkurve auf Kollimatoreffekte korrigiert. Dort ist zu sehen, daß die unempfindliche Zone 8 mm beträgt, was bedeutet, daß zu beiden Seiten

| Abstand vom Twister | Maximum bei | HWB | Energieauflösung |
|---|---|---|---|
| 3.5 mm | 438 mV | 132 mV | 30.1 % |
| 2.0 mm | 360 mV | 207 mV | 57.5 % |
| 1.0 mm | 83 mV | 56 mV | 67.5 % |

Tabelle 3.3: Einfluß eines 5 mm langen Twisters auf die Pulshöhe und die Energieauflösung

des Twisters der Straw auf 1.5 mm Länge keine Strahlung nachweisen kann.

In Abb. 3.17 bis Abb. 3.19 ist gezeigt, wie sich das Pulshöhenspektrum einer Ei-

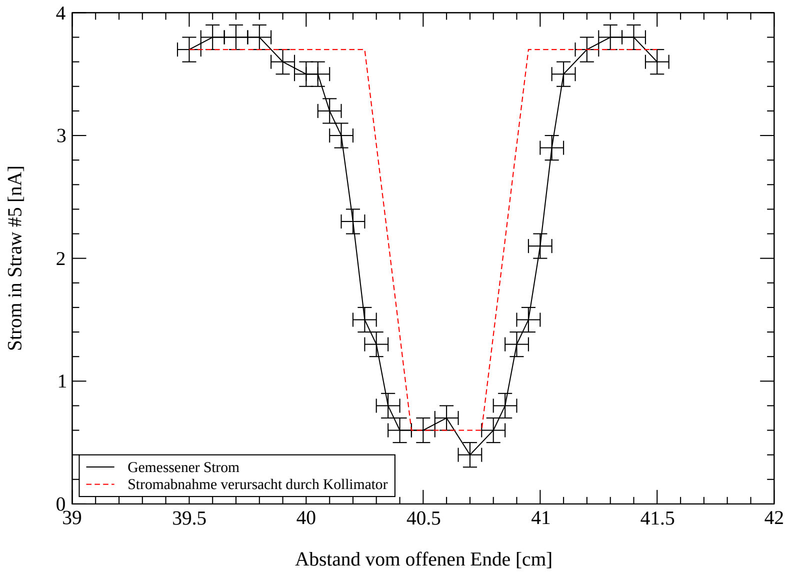


Abbildung 3.15: Strom in der Nähe eines 5 mm langen Nikhef-Twisters; die gestrichelte Linie zeigt den Strom, der sich aufgrund des 1 mm breiten Kollimators ergäbe, wenn die Pulshöhe bis zum Twister konstant bliebe.

senquelle mit Annäherung an den Twister verändert. Die Lage des Maximums des Eisenspektrums, die Halbwertsbreite und die daraus resultierende Energieauflösung ist in Tabelle 3.3 gezeigt.

Um das Pulshöhenspektrum bei einem Abstand von 1.0 mm noch messen zu können, mußte eine Softwareauswahl der Pulse programmiert werden, da die Rate vergleichbar mit der Störpulsrate war. Ein solcher Störpuls ist in Abb. 3.20 dargestellt, während ein normaler Puls in Abb. 3.10 zu sehen ist. Allerdings wurde bei dieser Messung der invertierte Ausgang des Vorverstärkers verwendet, der Puls war also positiv. Die Software verwarf alle Pulse mit einem negativen Nachschwinger.

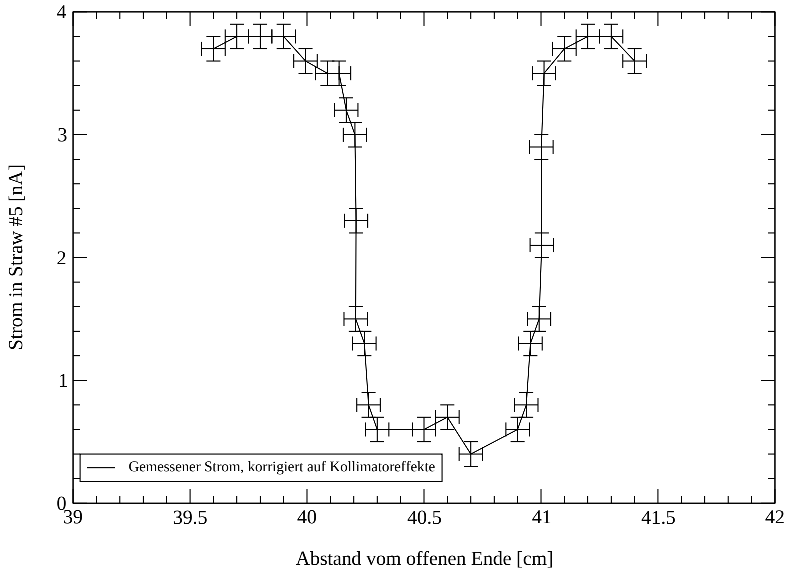


Abbildung 3.16: Strom in der Nähe eines 5 mm langen Nikhef-Twisters, korrigiert auf Effekte des Kollimators

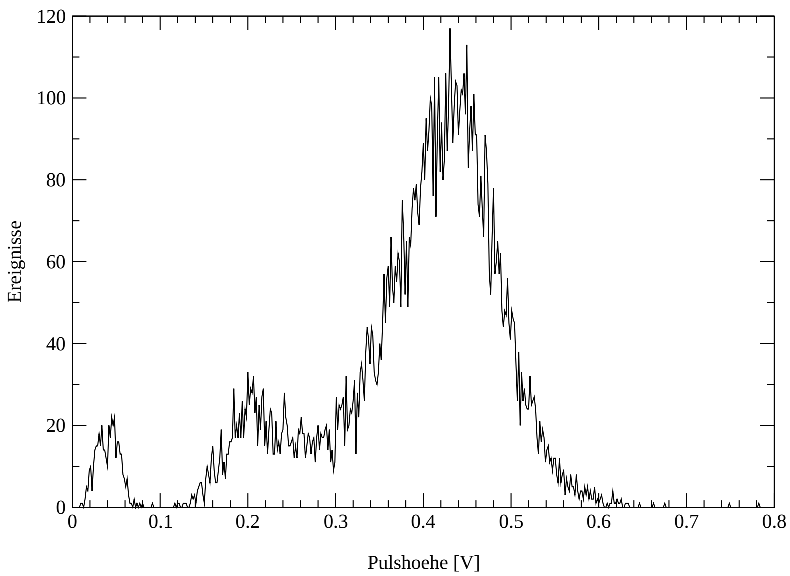


Abbildung 3.17: Pulshöhenspektrum, aufgenommen mit einer Fe-55-Quelle auf einem 1 mm breiten Kollimator in 3.5 mm Abstand vom Twister

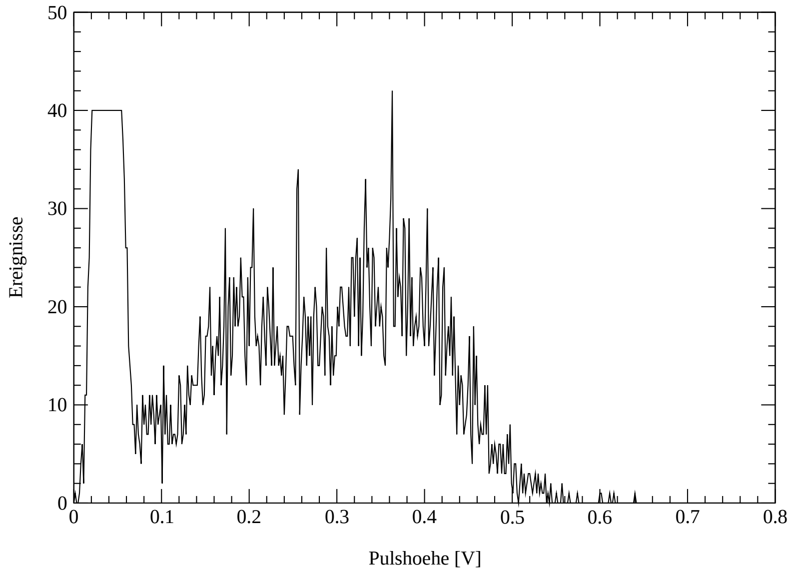


Abbildung 3.18: Pulshöhenspektrum, aufgenommen mit einer Fe-55-Quelle auf einem 1 mm breiten Kollimator in 2.0 mm Abstand vom Twister. Das abgeschnittene erste Maximum ist durch Störpulse bedingt.

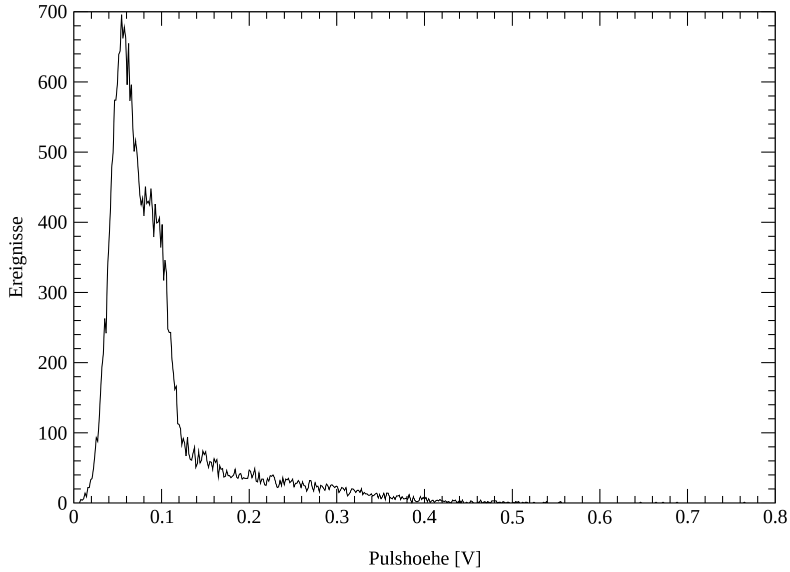


Abbildung 3.19: Pulshöhenspektrum, aufgenommen mit einer Fe-55-Quelle auf einem 1 mm breiten Kollimator in 1.0 mm Abstand vom Twister. Das höhere erste Maximum ist durch Störpulse bedingt.

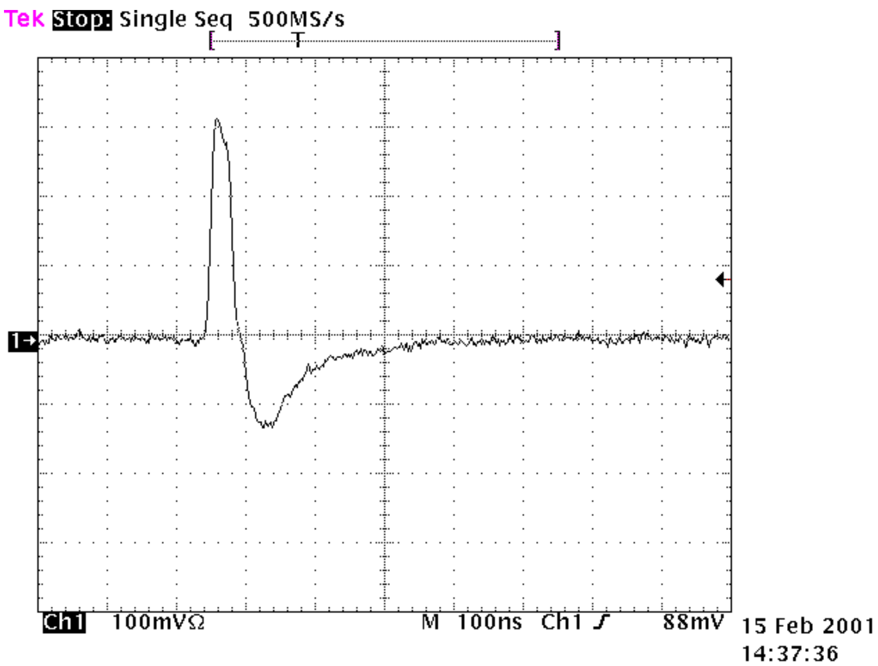


Abbildung 3.20: Signal, hervorgerufen durch vom Straw aufgefangene Störungen, die vom Vorverstärker verstärkt werden.

## 3.4 Pulshöhe entlang der Straws

Eine weitere Messung mit dem Röntgenmodul bestand darin, die relativen Pulshöhen entlang der Straws zu bestimmen. Dazu wurde eine Eisenquelle entlang des Straws verschoben und in regelmäßigen Abständen die über 1000 Pulse gemittelte Pulshöhe bestimmt. In Abb. 3.21 sind die Ergebnisse aufgetragen. Wie erwartet ist die Pulshöhe am Verstärkerende des Moduls etwas höher als am offenen Ende, was durch den endlichen Wellenwiderstand des Straws bedingt ist. Bei diesem Modul waren die Straws nicht auf die Platte aufgeklebt, sondern nur mit Klebestreifen an fünf Stellen befestigt. Dadurch bedingte Krümmungen der Straws und damit Auslenkungen der Drähte aus den Mittelpositionen sind die Ursache für die Pulshöhenschwankungen.

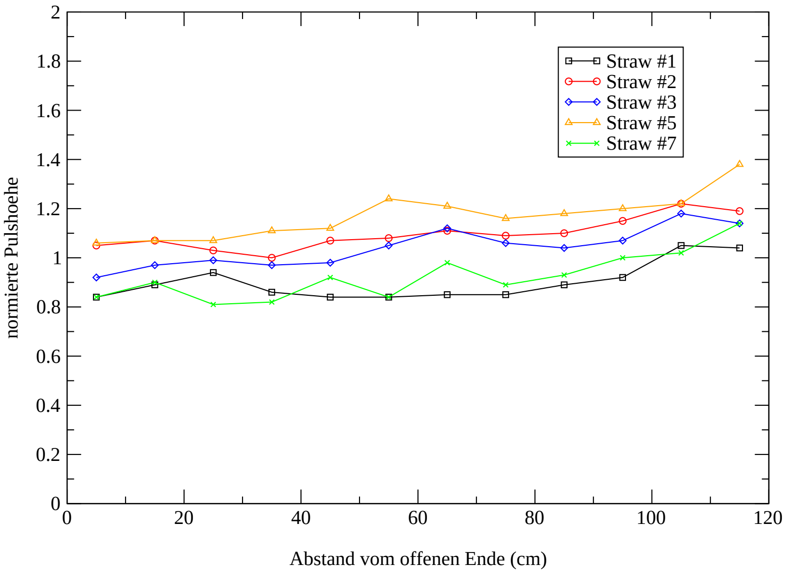


Abbildung 3.21: Pulshöhen entlang der Straws, korrigiert auf Verstärkereffekte

## 3.5 Zusammenfassung

Die Messungen der Signalpropagationsgeschwindigkeit ergaben, daß die Zeit, die das Signal benötigt, um in der längsten Kammer (in Station T9) vom offenen Ende bis zum Verstärker zu laufen, $4.0\text{m} \times 3.4\text{ns/m} = 13.6\text{ns}$ beträgt. Da ein Signal zumindest innerhalb von zwei Kollisionen (50 ns) gesammelt werden soll, bleiben ca. 40 ns für die Driftzeit, was einen Einfluß auf die Wahl der Gasmischung hat. Der aus technischen Gründen fehlende Abschluß der Straws in der Drahttrennung erweist sich als nützlich, da der reflektierte Puls die gemessene Ladung vergrößert, allerdings auf Kosten einer maximal verdoppelten Signallaufzeit.
Die Plateaumessungen ergaben, daß sowohl wegen der Energieauflösung als auch der

niedrigeren Betriebsspannung, die aufgrund einer höheren Hochspannungssicherheit vorzuziehen ist, ein Gas mit niedrigerem $CF_4$-Gehalt geeigneter ist. Hierbei sind aber noch genauere Messungen mit verschiedenen Gasmischungen nötig, auch um die unterschiedlichen Plateauenden beider Messung mit $Ar/CO_2$ zu überprüfen. Diese Messungen sind in [Rus01] beschrieben.
Die Wahl des Twisters ist von großer Bedeutung, da der Straw auch in einer Entfernung von bis zu 2 mm vom Twister ineffizient Teilchen nachweist. Daher sollte er so kurz wie möglich gefertigt werden.

# Kapitel 4

# Crosstalk

Mit Crosstalk bezeichnet man das Übersprechen eines Signalpulses durch kapazitive und induktive Kopplungen zwischen den Drähten einer Drahtkammer. Da die Straws aufgrund des zum Wickeln verwendeten Kaptons transparent für hohe Frequenzen sind, tritt ein solches Übersprechen auch zwischen von Straws umschlossenen Drähten auf. Zur Illustration wird eine vereinfachte Ersatzschaltung der kapazitiven Kopplungen in Abb. 4.1 gezeigt.

Da der im späteren Experiment verwendete ASD-BLR immer dann ein Signal erzeugt, wenn eine einlaufende Ladung eine einstellbare Schwelle überschreitet, muß man Crosstalk auf zwei verschiedene Arten betrachten: als analogen und als digitalen Crosstalk.

Das Berechnen der Crosstalkamplitude ist sehr schwierig, da sehr viele Faktoren wie Erdung oder Reflektionen die Amplitude entscheidend beeinflussen können. Außerdem sind sowohl kapazitive als auch induktive Kopplungen verantwortlich, wobei letztere durch die spiralartige Aufbringung der Aluminiumhülle der Straws begünstigt werden. Aus diesen Gründen ist man auf die Messung der Effekte angewiesen. Es gibt zwei Möglichkeiten, analogen Crosstalk zu messen: mit Hilfe einer radioaktiven Quelle oder mit Testpulsen.

Der analoge Crosstalk wird als das Verhältnis der Anteile gleicher Polarität der Signalamplituden auf einem signalführenden und seinen Nachbarstraws bestimmt. 2% analoger Crosstalk bedeuten also, daß auf den Nachbarkanälen ein Signal induziert wird, dessen Amplitude 2% der des Originalsignals beträgt.

Um aus dem analogen den digitalen Crosstalk zu bestimmen, muß man das Spektrum im Straw erzeugter Primärelektronen, simuliert durch eine Landauverteilung, betrachten. Abhängig von der am Verstärker eingestellten Schwelle ist die in den Nachbarstraws induzierte Ladung bei den Teilchen mit hoher Primärelektronenzahl groß genug, um die Schwelle zu überschreiten. Bei 2% analogem Crosstalk sind dies alle die, die eine Ladung größer der fünfzigfachen Schwellenladung erzeugen. Der Digitale Crosstalk in einem Straw ist definiert als das Verhältnis der falschen, durch analogen Crosstalk oberhalb der Schwelle erzeugten Signale und der echten, durch Teilchen erzeugten Signale im Nachbarstraw.

$$\text{Digitaler Crosstalk} = \frac{\text{Anzahl falscher Signale}}{\text{Anzahl echter Signale im Nachbarstraw}} \tag{4.1}$$

Der digitale Crosstalk wurde hier nicht gemessen, da er erstens vom Energiespek-

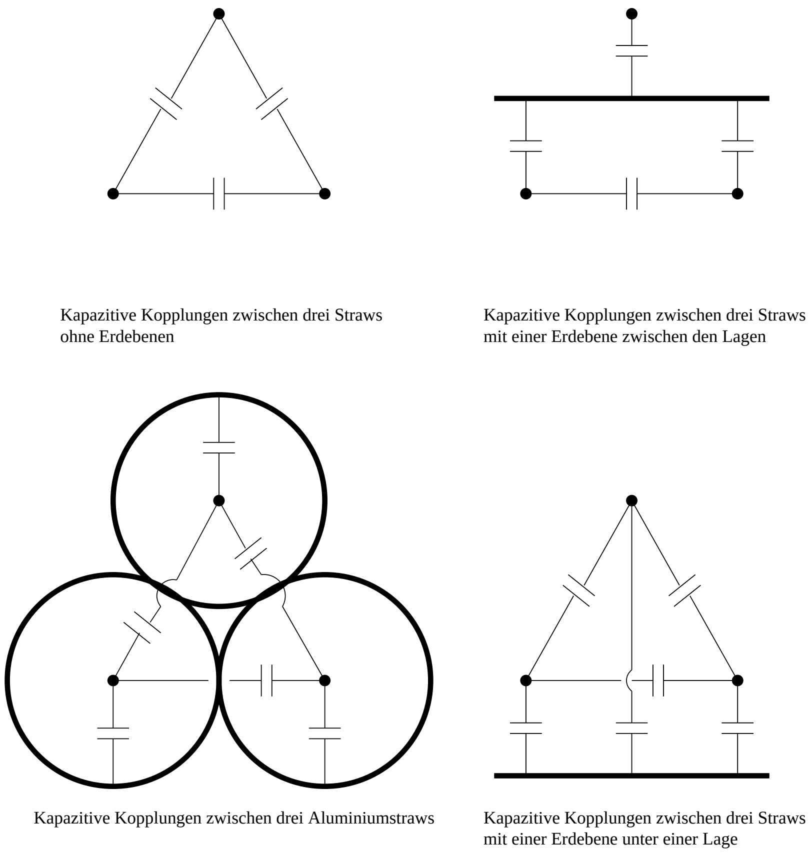


Abbildung 4.1: Ersatzschaltungsbild der kapazitiven Kopplungen von drei Straws mit verschiedenen Erdungsfolien

trum und der Art der nachgewiesenen Strahlung (je mehr Ladung im Straw deponiert wird, desto wahrscheinlicher ist es, daß der Crosstalk-Puls die Verstärkerschwelle überschreitet) und zweitens vom endgültigen Design und der verwendeten Ausleseelektronik abhängt (Je störungsfreier das Modul, desto niedriger kann die Schwelle gesetzt werden). Allerdings kann das Spektrum der gemessenen Ladung durch eine einer Landauverteilung ähnliche Verteilung angenähert werden, wie in Abb. 4.2 gezeigt ist. Eine Näherung [Moy55] der Verteilung ist gegeben durch:

$$\psi(\lambda) = \sqrt{\frac{1}{2\pi} e^{-(\lambda + e^{-\lambda})}} \text{ mit } \lambda = R(E - E_p) \tag{4.2}$$

Die Kurve in Abb. 4.2 ist nur eine grobe Näherung eines echten Spektrums und wird hier nur gezeigt, um den Zusammenhang zwischen analogem und digitalem Crosstalk zu erläutern. Ebenso sollen die in folgender Tabelle gegebenen Werte nur eine qualitative Abhängigkeit zeigen, die in keinem Fall linear ist und stark von der Pulsform und der gewählten Schwelle, die hier als 0.05 gewählt wurde, abhängt.

Digitaler Crosstalk bedeutet wie oben gesagt, daß das einlaufende Signal groß genug ist, um die ASD-BLR-Schwelle zu überschreiten. Da dies in allen benachbarten Straws geschieht, bedeutet dies, daß bei einem analogen Crosstalk von 10 % bei einem Drittel

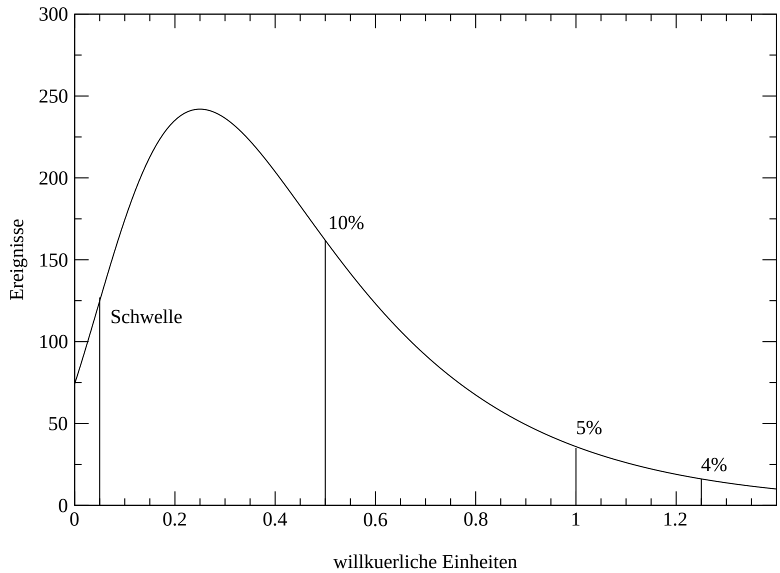


Abbildung 4.2: Näherung einer Landauverteilung, die senkrechten Linien bezeichnen von links nach rechts die Schwelle und Pulshöhen, ab denen 10, 5 und 4 % Crosstalk die Schwelle ebenfalls überschreiten.

| analoger Crosstalk [%] | digitaler Crosstalk[%] |
|---|---|
| 2 | 0.06 |
| 4 | 3.5 |
| 5 | 7.7 |
| 10 | 37.2 |

Tabelle 4.1: Qualitativer Zusammenhang zwischen analogem und digitalem Crosstalk, berechnet aus Abb. 4.2

aller Signale alle vier benachbarten Straws (und eventuell auch noch weiter entfernte) einen Zählimpuls erzeugen. Dies macht die Notwendigkeit eines auf niedrigen Crosstalk optimierten Moduls deutlich.
Um verlässliche Aussagen über den digitalen Crosstalk zu erhalten, muß ein Modul mit einem möglichst endgültigen Design in einem Strahltest eingesetzt werden, was für Herbst 2001 geplant ist.
In Abb. 4.3 ist der digitale Crosstalk in einem von Nikhef gebauten Modul gezeigt, der in einem Strahltest im Frühjahr 2001 gemessen wurde. Dazu wurden mittels einer Spurrekonstruktion falsche Signale identifiziert und gezählt. Wie in der Abbildung zu sehen, schwankt der digitale Crosstalk je nach Position und Strawlage zwischen 4 und 7 %.

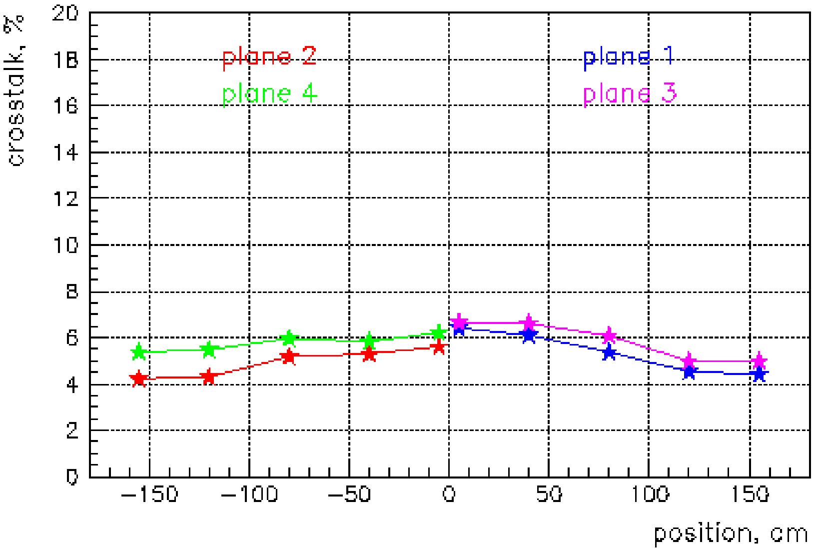


Abbildung 4.3: Digitaler Crosstalk, gemessen im Strahltest im Frühjahr 2001 mit einem Nikhef-Modul [Gou01]. Gezeigt ist der digitale Crosstalk gemessen in Prozent über die Länge. Plane 1 und 2 sind die beiden Hälften der oberen Lage, 3 und 4 die der unteren.

## 4.1 Crosstalk-Messung mit einer radioaktiven Quelle

Um den Einfluß einer Erdebene zu bestimmen, wurde ein 50 cm langes Modul mit 8 Straws gebaut, welches mit einer beweglichen, mit Aluminiumfolie bezogenen Platte ausgestattet war. Dabei wurden 4 HERA-B-Straws, 2 Double-Kapton-XC-Straws mit Goldkathode und 2 Aluminiumstraws verwendet. Sowohl die Straws als auch das die Straws umgebende Gasvolumen wurden mit Zählgas gespült. Ein Foto dieses Moduls ist in Abb. 4.4 zu sehen.
Dieses Modul war das erste mit mehr als einem Straw, das in Heidelberg konstruiert wurde, und daher auch dazu gedacht, die Produktion eines Moduls zum ersten Mal zu testen.
Leider stellte es sich heraus, daß dieses Modul für die Crosstalkmessung nicht geeig-

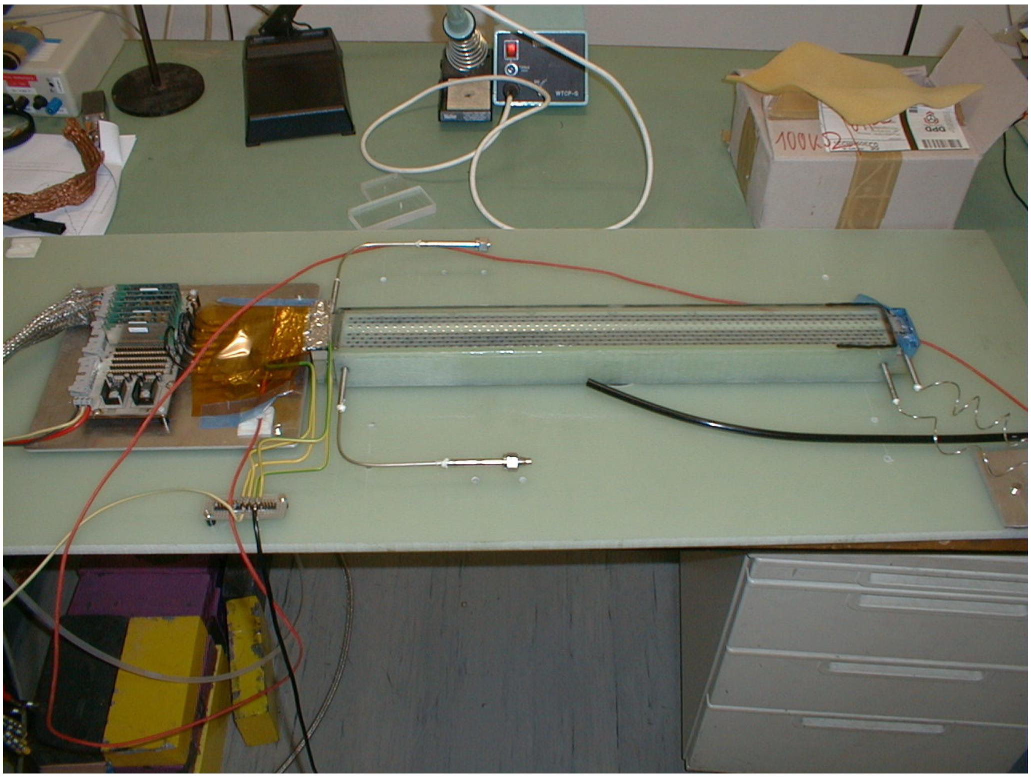

Abbildung 4.4: 8-Straw-Aufbau mit Elektronik und abgetrennter Gaszufuhr

net war, da die Komplexität des Problems unterschätzt wurde. Das Modul zeigte zwar Crosstalk zwischen den Straws, dieser hing aber von vielen Faktoren ab, was eine genaue Bestimmung der Ursache unmöglich machte. So überdeckten der Crosstalk über die Hochspannungsversorgung, die Erdung der Strawkathoden, die Ausleseelektronik und über die Lötstecker der Endkappen den direkt zwischen den Drähten stattfindenden so weit, daß er nicht mehr hinreichend genau zu messen war. Auch veränderte sich die Pulsform des Crosstalkes stark in Abhängigkeit von Veränderungen an den Erdungsverbindungen, was, da nur die Amplitude des Crosstalksignals gemessen wurde, einen direkten Einfluß auf das Messergebnis hatte. Dennoch war dieses Modul ein wichtiger Entwicklungsschritt, da sich beim Betrieb die Notwendigkeit für einen Crosstalkaufbau ohne Elektronik oder Hochspannung ergab. Außerdem kamen einige Anregungen zur Weiterentwicklung zum Beispiel der Endkappe aus diesem Modul. Auch wurde es zur Inbetriebnahme des Röntgenbunkers eingesetzt. Eine spätere Mes-

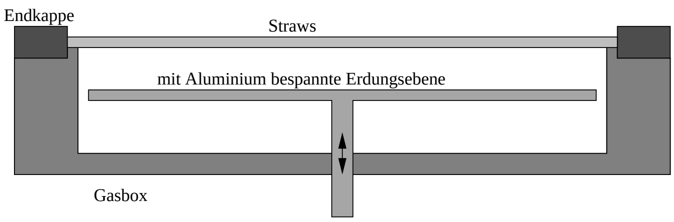


Abbildung 4.5: Risszeichnung des 8-Straw-Aufbaus mit Endkappen, Straws, Gasbox und Erdebene; die Erdebene ist vertikal verstellbar.

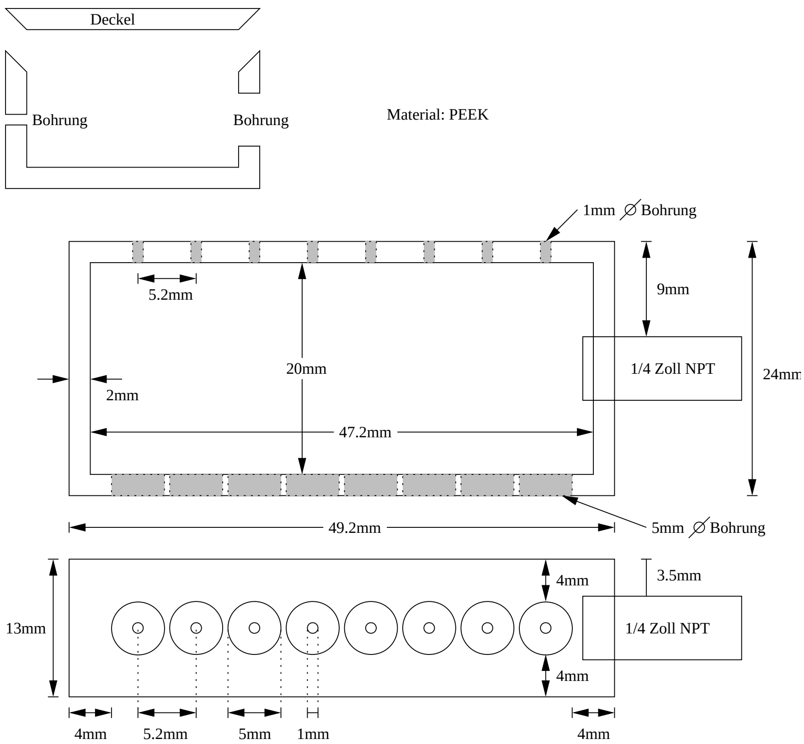


Abbildung 4.6: Detailzeichnung der Endkappe des 8-Straw-Moduls, mit dem der Crosstalk gemessen werden sollte; in die 1 mm Bohrungen wurden Metallstifte eingeklebt, auf die die Drähte gelötet wurden, in den 5 mm Bohrungen 10 mm lange Plastikrohre, die die Straws hielten.

sung mit einem der beiden für die Röntgenanlage gedachten Modulen brachte etwas bessere Ergebnisse. Dazu wurden bei dem mit Double-Kapton-XC-Straws bestückten

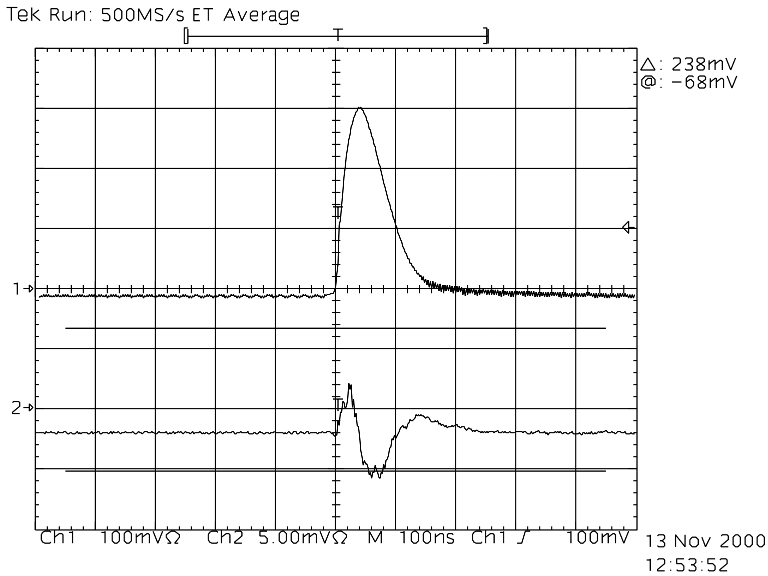


Abbildung 4.7: Signal- (oben, positive Amplitude 310 mV) und Crosstalkpuls (unten, positive Amplitude 4.0 mV) von benachbarten Straws im 8-Straw-Aufbau; daraus folgt ein Crosstalk von $\frac{4.0\mathrm{mV}}{310\mathrm{mV}} = 1.3\%$.

| Kanal Nummer | Crosstalk ohne Aluminium [% ] | Crosstalk mit Aluminium [% ] |
|---|---|---|
| 5 | bestrahlt | bestrahlt |
| 6 | 9.9 | 4.4 |
| 7 | 8.7 | 4.4 |
| 8 | 8.9 | 5.0 |

Tabelle 4.2: Crosstalkwerte, erhalten aus der Messung mit dem Röntgenanlagen-Modul, in Prozent

Modul vier benachbarte Straws simultan über VV50-Vorverstärker ausgelesen und jeweils ein Pulshöhenspektrum erstellt. Diese sind in Abb. 4.8 gezeigt. Das Spektrum des gepulsten Straws ist dabei um einen Faktor 5 reduziert. Durch einen Vergleich der Lage der Maxima erhält man einen Wert des Crosstalks, wobei hier nicht zwischen den Ursachen unterschieden werden konnte. Allerdings ist in Tabelle 4.2 deutlich zu sehen, daß der Nachbarstraw einen höheren Crosstalk sieht als die übrigen beiden. Zum Vergleich ist in Abb. 4.9 das Ergebnis einer Messung, bei der die Straws durch eine 25$\mu$m dicke Aluminiumfolie abgedeckt waren. Der Crosstalk in allen Kanälen ist um die Hälfte reduziert, aber immer noch sehr hoch. Dies ist auf Kopplungen über die Endkappen, Elektronik, Erdung und Hochspannungsversorgung zurückzuführen. Da zu diesem Zeitpunkt die Ergebnisse der in Kap. 4.2 vorgestellten Messungen schon vorlagen, wurden diese Ergebnisse nicht weiter untersucht.

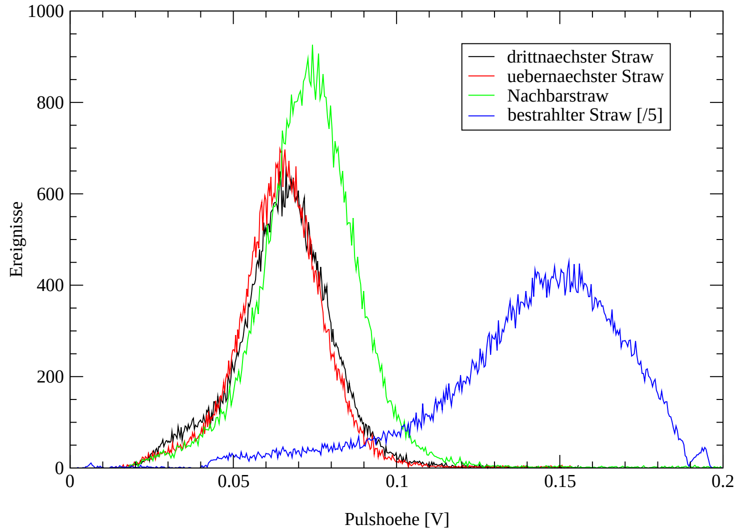


Abbildung 4.8: Crosstalk, gemessen mit dem an der Röntgenanlage eingesetzten Modul. Die Pulshöhe des bestrahlten Straws ist gegenüber denen der unbestrahlten um einen Faktor 5 reduziert. Als Gas wurde Ar/$CO_2$/$CF_4$ 65/5/30 verwendet

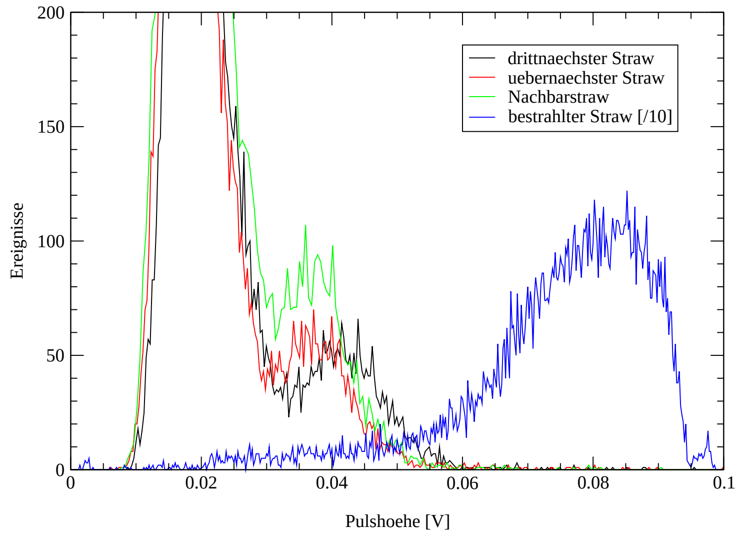


Abbildung 4.9: Crosstalk, gemessen mit dem an der Röntgenanlage eingesetzten Modul. Die Pulshöhe des bestrahlten Straws ist gegenüber denen der unbestrahlten um einen Faktor 10 reduziert. Als Gas wurde Ar/$CO_2$/$CF_4$ 65/5/30 verwendet. Die Straws sind hier mit einer Aluminiumfolie abgedeckt.

## 4.2 Crosstalk-Messung mit Testpulsen

Um den Fehler eines zu komplizierten Aufbaus wie bei dem 8-Straw-Moduls nicht zu wiederholen, wurde bei dem Aufbau zur Crosstalk-Messung auf Hochspannung und Gasfluß verzichtet, ebenso auf eine Ausleseelektronik. Er bestand aus zwei Lagen mit insgesamt 15 Straws. Die Numerierung der Straws war 11-18 in der unteren Lage, 21-27 in der oberen. Straws Nr. 16 - 18, 26 und 27 waren Aluminium-Straws (mit leitfähigem Kleber), die übrigen Double-Kapton-XC Straws. Die Länge der Straws betrug 166 cm. In Abb. 4.10 ist eine Ansicht des gesamten Aufbaus und in Abb. 4.11 eine Detailansicht des Ausleseendes zu sehen, während in Abb. 4.12 eine schematische Darstellung des Aufbaus gezeigt ist. Am Ausleseende waren die Drähte mit 332 Ω gegen Erde abgeschlossen, was etwa der Impedanz der Straws entspricht. Der Pulser, ein HP-8082A-Pulse Generator, wurde auf der linken Seite über einen 18 pF Kondensator am offenen Ende eingekoppelt, wobei jeder Straw gepulst werden konnte. Auf der rechten Seite konnte das Oszilloskop ebenfalls an alle Straws angeschlossen werden.

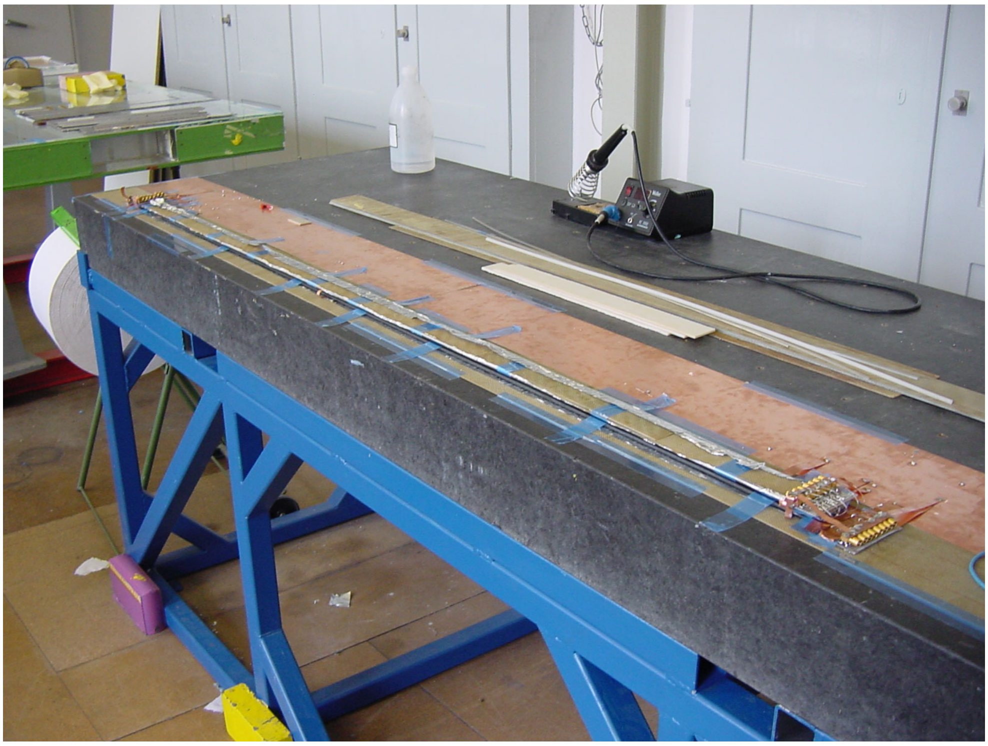

Abbildung 4.10: Foto des Crosstalk-Aufbaus. Zu sehen sind die beiden Lagen und die Kupfer-Erdebene neben den Straws. Links oben wurde der Puls eingekoppelt, rechts unten ausgelesen.

Der Pulser erzeugt Pulse mit einer Amplitude von 500 mV und einer Länge von 100ns. Als Crosstalk wurde die maximale Amplitude mit gleichem Vorzeichen wie der Originalpuls des induzierten Signals definiert, wobei jeweils über 1000 Pulse gemittelt wurde. Da später der im Experiment verwendete Verstärker ASD-BLR nicht über die Ladung integiert, sondern nur einen Zählpuls erzeugt, wenn die einlaufende Ladung eine Schwelle überschreitet, stellt diese Definition eine gute Simulation des im Experiment

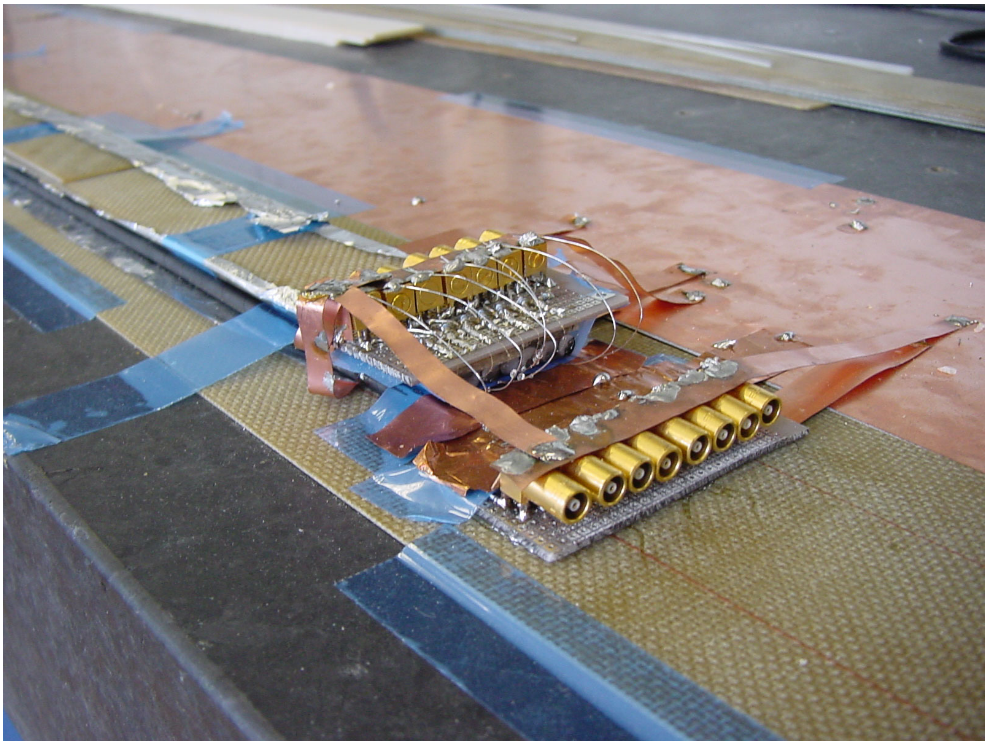

Abbildung 4.11: Großaufnahme des Ausleseendes des Crosstalk-Aufbaus. Unter beiden Lagen ist eine Aluminiumfolie eingezogen, zwischen den Straws allerdings keine.

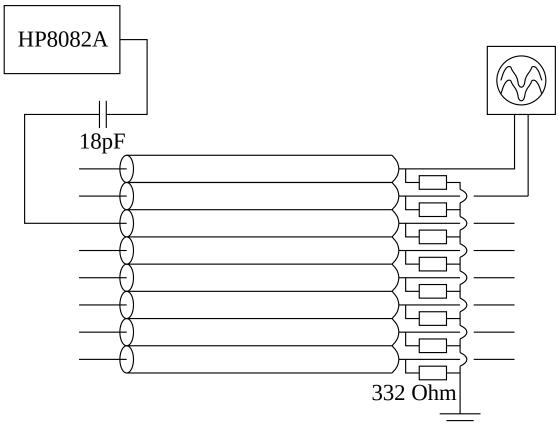


Abbildung 4.12: Der Aufbau, der zum Messen des analogen Crosstalks zwischen Aluminium- und Double-Kapton-XC-Straws verwendet wurde

vorkommenden Crosstalks dar. Der Originalpuls und ein typisches Crosstalk-Signal sind in Abb. 4.13 zu sehen.

Neben dem Aufbau war über die gesamte Länge eine mit Kupfer beschichtete GFK-Platte angebracht, die als Erdung diente. Verbunden mit dieser Erdplatte waren die Kathoden am Ausleseende, die 332 Ω Widerstände, das Oszilloskop und die Alumi-

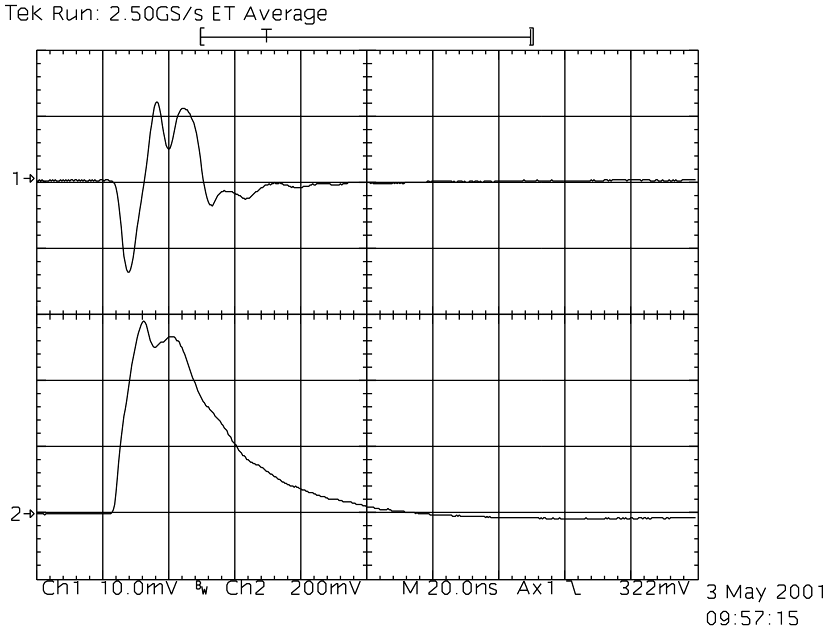


Abbildung 4.13: Originalpuls (unten, positive Amplitude 560 mV) und Crosstalk-Signal (oben, positive Amplitude 12 mV) auf benachbarten Straws, einem Crosstalk von $\frac{12\mathrm{mV}}{560\mathrm{mV}} = 2.1\%$ entsprechend.

niumhüllen der Straws an beiden Enden und in der Mitte. Letzteres war notwendig, um Oszillationen in den Straws auf ein Minimum zu reduzieren. Die eingezogenen Aluminiumfolien (Dicke 15$\mu$m) hatten ebenfalls an diesen drei Stellen Kontakt mit der Erdplatte. Es hat sich aber als vorteilhaft erwiesen, die Aluminiumstraws über die gesamte Länge leitend miteinander zu verbinden (zum Beispiel über die Aluminiumfolien), da dadurch die Oszillationen, die auch in Abb. 4.13 zu sehen sind, minimiert werden. Dies ist auch der Grund, warum die Messungen, in denen zwei oder mehr Aluminiumfolien verwendet wurden, genauer sind als die übrigen.
Aufgrund der negativen Erfahrungen mit dem Vorgängermodul wurde auch der Crosstalk, den die Endstücke verursachten, gemessen. Er betrug zwischen 0.1 und 0.5 %. Zwischen den Endstücken und dem Strawende lagen die Drähte auf einer Strecke von 2 cm frei nebeneinander, was sich aus mechanischen Gründen nicht vermeiden ließ. Da die zwischen den Straws angebrachten Aluminiumfolien mit den Endstücken verbunden waren, reduzierten diese den durch die Endstücke verursachten Crosstalk. Dies ist in Abb. 4.16 bis 4.23 zu sehen; der Crosstalk in weit vom gepulsten Straw entfernten Straws ist generell kleiner, wenn Aluminiumfolien im Modul eingebaut sind.
Variiert wurde in der Messung die Lage und Anzahl von Aluminium-Erdungsfolien und der Abstand zwischen den Strawlagen. Gepulst wurden Straws Nr, 13, 15, 16, 17, 21, 24, 25 und 26, was in Abb. 4.16 bis 4.23 graphisch dargestellt ist.
Die Meßfehler der ersten drei Aufbauten liegen bei $\pm$ 0.2%, die der letzten drei bei $\pm$ 0.05%.
Die fett und kursiv gedruckten Prozentwerte entsprechen einer anderen Pulsform, die in Abb. 4.14 dargestellt ist, während zum Vergleich eine "normale" Pulsform in Abb.

4.15 zu sehen ist. Bei beiden Abbildungen wurde Straw #17 gepulst, daher sollten die Signale in Straw #16 und #18 aufgrund des gleichen Abstands identisch sein. Im Unterschied zu einer normalen Crosstalk-Pulsform mit von der Amplitude her ähnlichen positiven und negativen Anteilen war hier der positive wesentlich stärker ausgeprägt. Da nur die Amplitude des positiven Anteils gemessen wurde, erklärt sich hieraus der im Vergleich mit den Nachbarstraws zu hohe Crosstalkwert. Obwohl diese Pulsform hauptsächlich in den Aluminiumstraws am Rand der Lage auftrat, war ihre Ursache nicht in Randeffekten zu suchen. Nachdem zwei weitere Aluminiumstraws neben dem äußersten angebaut wurden, war die Pulsform immer noch unverändert. Eine mögliche Ursache für diese Form ist eine andersartige Erdung der äußeren Aluminiumstraws. Aus Zeitmangel konnte dieser Effekt leider nicht mehr genauer untersucht werden.

Aus diesen Messungen wurden folgende Schlußfolgerungen gezogen:

- je mehr Alufolien, desto geringer der Crosstalk:
    - kapazitive Kopplung vom Draht zur Groundebene ist höher als zum Nachbardraht
- Aluminiumstraws verhalten sich wesentlich ruhiger als Double-Kapton-XC-Straws:
    - äußere Aluminiumschicht schirmt den Puls ab, sowohl in den Straw, als auch aus einem gepulsten Straw heraus
- eine Folie zwischen den Lagen reduziert den Crosstalk zu den Straws in der nicht gepulsten Lage auf fast Null:
    - das elektrische Feld wird durch die Folie abgeschirmt
- eine Folie unter einer Lage reduziert den Crosstalk in dieser Lage mehr als eine Folie zwischen den beiden:
    - wenn die Folie unter einer Lage angebracht wird, existieren zusätzlich zu der kapazitiven Kopplung zu den Erdfolie auch welche zu den Drähten der zweiten Lage, was die Signale auf den Drähten derselben Ebene reduziert
- je größer der Abstand zwischen den Lagen ist, desto größer ist der Crosstalk in der gepulsten, und desto kleiner in der ungepulsten Lage:
    - ungepulste Lage: die kapazitive Kopplung wird mit wachsendem Abstand kleiner
    - gepulste Lage: Kopplung zur zweiten Lage wird kleiner und damit die innerhalb der ersten größer

## 4.3 Zusammenfassung

Crosstalk ist ein sehr wichtiges Designkriterium beim Bau eines Strawmoduls, da ein zu hoher Crosstalkanteil eine Spurrekonstruktion völlig unmöglich machen kann. Double-Kapton-XC-Straws bieten keine Abschirmung gegen kapazitive und induktive Kopplungen und sind damit nur zusammen mit mehreren Aluminiumfolien geeignet, was die Dicke eines Moduls in Strahlungslängen erhöht. Aluminiumstraws besitzen wesentlich bessere Eigenschaften, sowohl was den Schutz vor Crosstalk als auch vor von außen eindringenden Störsignalen angeht. Allerdings sollte auch bei Aluminiumstraws zwischen Honeycombplatte und Straws in beiden Lagen eines Moduls eine Aluminiumfolie eingezogen werden, was den Crosstalk nochmal um die Hälfte reduziert. Außerdem neigen die Aluminiumstraws dazu, Oszillationen zu erzeugen, die nur durch eine Erdung über die gesamte Länge verhindert werden können, was durch die Aluminiumfolien gewährleistet ist. Eine Folie zwischen den beiden Lagen bringt nur eine unwesentliche Verbesserung, würde aber den Produktionsaufwand stark erhöhen.

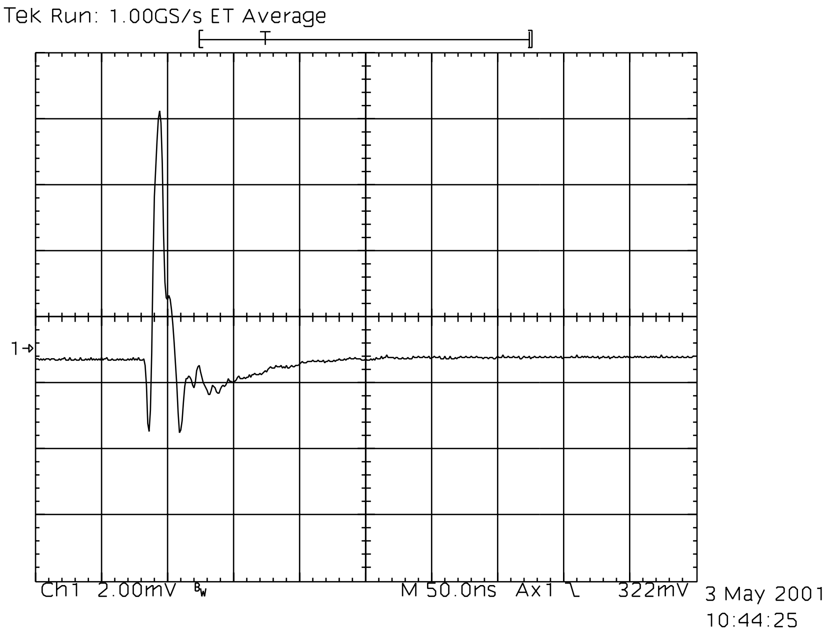


Abbildung 4.14: Ungewöhnliche Pulsform (hier in Straw #18, Straw #17 gepulst); der positive Anteil des Pulses ist mehr als doppelt so groß wie der des in Abb. 4.15 gezeigten.

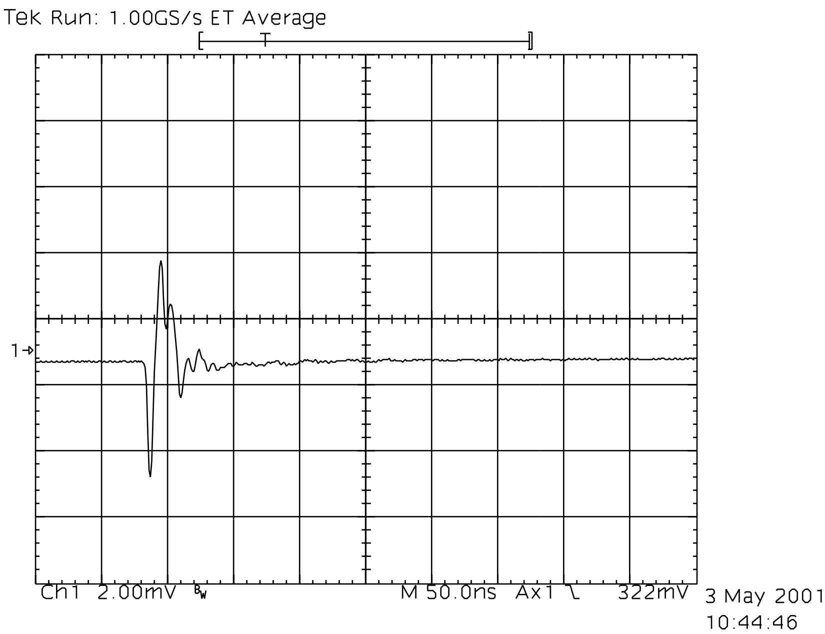


Abbildung 4.15: Normale Pulsform (in Straw #16, Straw #17 gepulst) mit gleichgroßem positiven und negativen Anteil

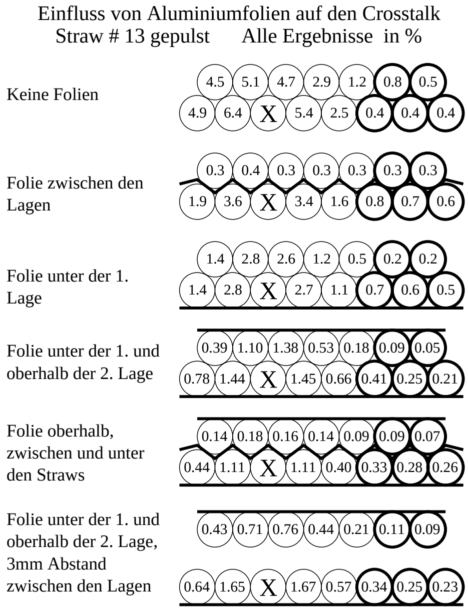


Abbildung 4.16: Straw 13 wird gepulst, alle Angaben in Prozent analoger Crosstalk: $\frac{\text{PulshöheCrosstalkpuls}}{\text{PulshöheOriginalpuls}}$. Die dünnen Kreise entsprechen Double-Kapton-XC-Straws, die dicken Aluminiumstraws. Variiert wurden Anzahl und Lage von 25$\mu$m dicken Aluminiumfolien.

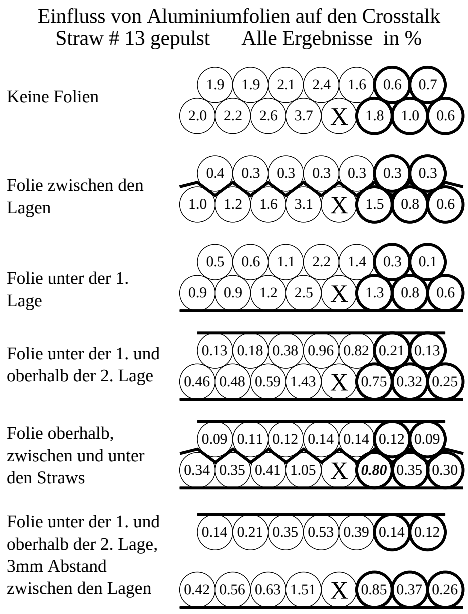


Abbildung 4.17: Straw 15 wird gepulst, alle Angaben in Prozent analoger Crosstalk: $\frac{\text{PulshöheCrosstalkpuls}}{\text{PulshöheOriginalpuls}}$. Die dünnen Kreise entsprechen Double-Kapton-XC-Straws, die dicken Aluminiumstraws. Variiert wurden Anzahl und Lage von 25$\mu$m dicken Aluminiumfolien.

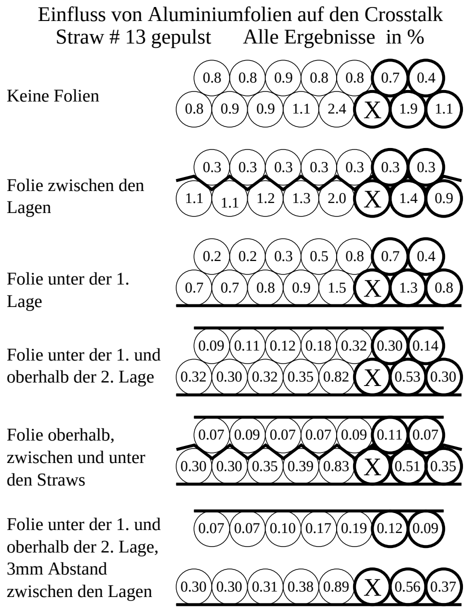


Abbildung 4.18: Straw 16 wird gepulst, alle Angaben in Prozent analoger Crosstalk: $\frac{\text{PulshöheCrosstalkpuls}}{\text{PulshöheOriginalpuls}}$. Die dünnen Kreise entsprechen Double-Kapton-XC-Straws, die dicken Aluminiumstraws. Variiert wurden Anzahl und Lage von 25$\mu$m dicken Aluminiumfolien.

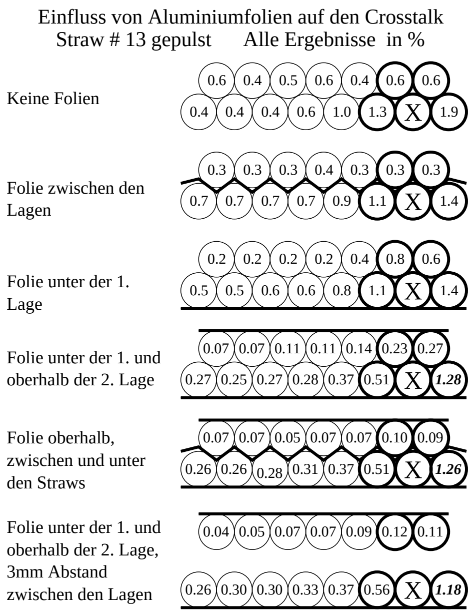


Abbildung 4.19: Straw 17 wird gepulst, alle Angaben in Prozent analoger Crosstalk: $\frac{\text{PulshöheCrosstalkpuls}}{\text{PulshöheOriginalpuls}}$. Die dünnen Kreise entsprechen Double-Kapton-XC-Straws, die dicken Aluminiumstraws. Variiert wurden Anzahl und Lage von 25$\mu$m dicken Aluminiumfolien.

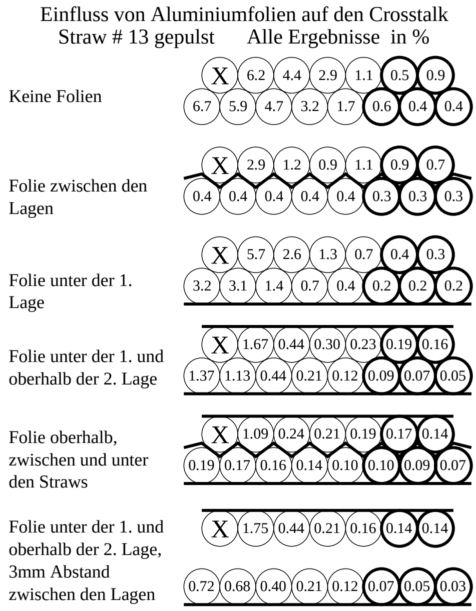


Abbildung 4.20: Straw 21 wird gepulst, alle Angaben in Prozent analoger Crosstalk: $\frac{\text{PulshöheCrosstalkpuls}}{\text{PulshöheOriginalpuls}}$. Die dünnen Kreise entsprechen Double-Kapton-XC-Straws, die dicken Aluminiumstraws. Variiert wurden Anzahl und Lage von $25\mu$m dicken Aluminiumfolien.

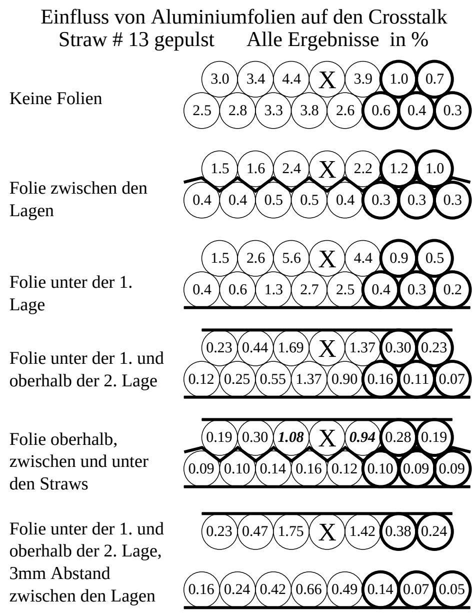


Abbildung 4.21: Straw 24 wird gepulst, alle Angaben in Prozent analoger Crosstalk: $\frac{\text{PulshöheCrosstalkpuls}}{\text{PulshöheOriginalpuls}}$. Die dünnen Kreise entsprechen Double-Kapton-XC-Straws, die dicken Aluminiumstraws. Variiert wurden Anzahl und Lage von $25\mu$m dicken Aluminiumfolien.

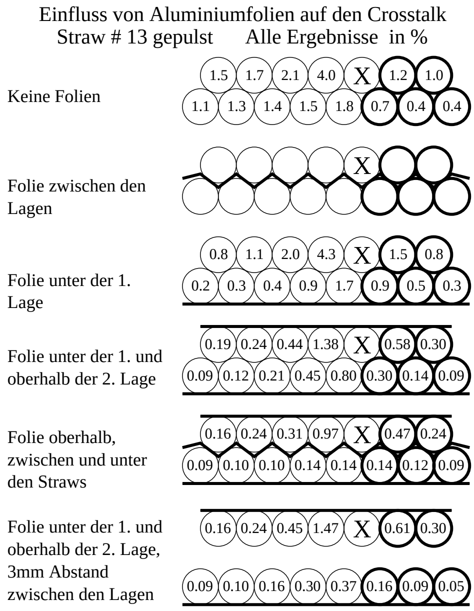


Abbildung 4.22: Straw 25 wird gepulst, alle Angaben in Prozent analoger Crosstalk: $\frac{\text{PulshöheCrosstalkpuls}}{\text{PulshöheOriginalpuls}}$. Die dünnen Kreise entsprechen Double-Kapton-XC-Straws, die dicken Aluminiumstraws. Variiert wurden Anzahl und Lage von $25\mu$m dicken Aluminiumfolien.

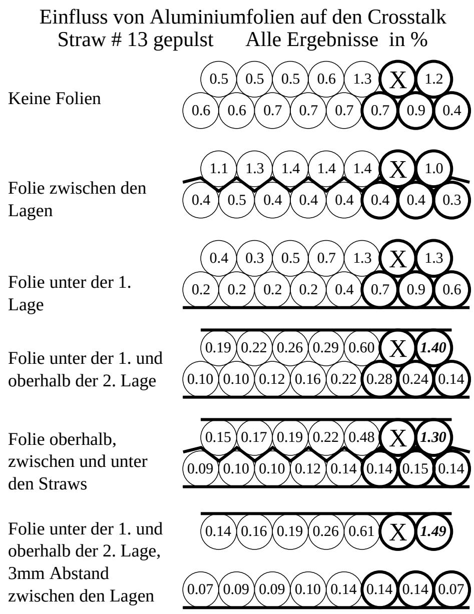


Abbildung 4.23: Straw 26 wird gepulst, alle Angaben in Prozent analoger Crosstalk: $\frac{\text{PulshöheCrosstalkpuls}}{\text{PulshöheOriginalpuls}}$. Die dünnen Kreise entsprechen Double-Kapton-XC-Straws, die dicken Aluminiumstraws. Variiert wurden Anzahl und Lage von $25\mu$m dicken Aluminiumfolien.

# Kapitel 5

# Messungen mit einer starken Röntgenröhre

Die Messungen an der Heidelberger Röntgenanlage der Firma Fein Focus wurden mit drei verschiedenen Modulen durchgeführt. Bei den ersten Tests kam das zur Crosstalkmessung gebaute und in Kapitel 4.1 vorgestellte 8-Straw-Modul mit beweglicher Erdebene zum Einsatz.
Außerdem wurden zwei weitere Module mit jeweils 8 Straws speziell für den Einsatz an der Röntgenröhre gebaut. Das erste bestand aus 8 Double-Kapton-XC-Straws ohne Erdungsfolien, das zweite aus Aluminiumstraws, aufgeklebt auf einer mit Aluminium beschichteten Honeycomb-Platte. Die Endkappen dieser beiden Module waren nach dem in Kapitel 2.1.7 vorgestellten Alternativdesign gefertigt.
Die Hälfte der im zweiten Modul verwendeten Aluminiumstraws war mit normalem Kleber zwischen der Aluminium- und der Kaptonlage gefertigt, bei den Straws der anderen Hälfte wurde dem Kleber Karbonpartikel zugegeben, um ihn leitfähig zu machen. Leider gab es bei der Fertigung dieser Straws bei der Herstellerfirma Lamina einige Probleme, die zur Folge hatten, daß diese Straws nicht gasdicht waren. Trotz eines Abdichtens mit Mylarfolie und STYCAST war der Wassergehalt im gesamten Modul sehr hoch. Dies hatte vor allem Auswirkungen auf die in Kapitel 5.2 beschriebenen Aufladungseffekte.

## 5.1 Charakteristika der Röntgenanlage

Der Meßaufbau an der Röntgenröhre ist in Abb. 5.1 dargestellt. Um möglichst flexibel zu sein, wurden zwei Kollimatoren verwendet. Der erste war direkt auf der Röhre montiert und bestand aus 1 cm Blei mit einer Bohrung mit einem Durchmesser von 4 mm. Der Zweite war auf einer Aluminiumplatte angebracht und konnte je nach Messung ausgetauscht werden. Die Anode der Röhre besteht aus Kupfer, was bedeutet, daß die $K_\alpha$-Linie eine Energie von 9 keV besitzt. Spektren der Röntgenröhre bei verschiedenen Röhrenspannungen sind in Abb. 5.2 zu sehen. Da sich die Spektren nicht sehr voneinander unterscheiden, wurde eine mittlere Spannung, nämlich 38 kV als Betriebspunkt für alle weiteren Messungen gewählt. Um das Maximum des Kupferspektrums noch schärfer zu sehen, wurden noch Versuche mit Absorbern, die zwischen Röntgenröhre

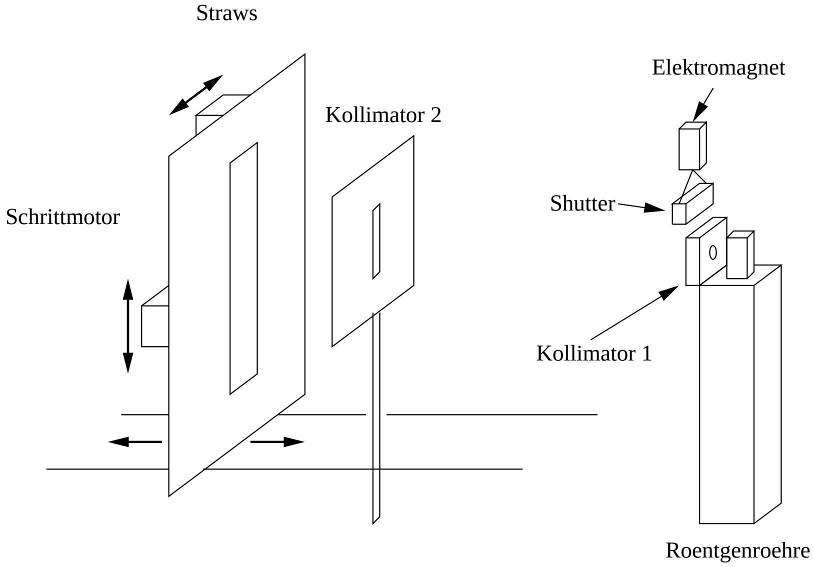


Abbildung 5.1: Messaufbau an der Röntgenröhre

und Straws angebracht wurden, unternommen. Zwei Spektren, eines mit 30$\mu$m Kupfer und eines mit 40$\mu$m Edelstahl, sind in Abb. 5.3 dargestellt. Der Edelstahlabsorber absorbiert die $K_\alpha$-Linie stärker als die Bremsstrahlung, daher liegt das Maximum bei niedrigeren Energien. Das Kupfer absorbiert die Bremstrahlung etwas mehr als das Maximum, allerdings ist die Verbesserung nicht wesentlich. Daher wurde auf einen Absorber verzichtet.

Nach einem Totalausfall der Anlage und anschließender Reparatur traten einige Probleme beim Betrieb der Röhre auf, die auf einen defekten Kondensator auf der für die Fokussierung verantwortliche Platine zurückzuführen waren. Da eine weitere Reparatur sehr zeitaufwendig gewesen wäre, wurde sie bis nach Ende dieser Diplomarbeit verschoben. Ein Problem war die Tatsache, daß die Strahlungsintensität nicht wie angenommen linear mit dem Röhrenstrom zunahm, sondern bei einem Röhrenstrom von 0.1 bis 0.3 mA ein "Plateau" bildete, wie in Abb. 5.4 dargestellt.

Für diesen Effekt gibt es zwei mögliche Erklärungen:

1. Es gibt einen Sättigungseffekt in den Straws, der dafür sorgt, daß die Zählrate trotz ansteigender Intensität konstant bleibt

2. Ein Defekt der Röntgenröhre bewirkt, daß ein Steigern des Röhrenstroms nicht auch die Intensität erhöht

Eine Wiederholung der Messung bei einem größeren Abstand zur Erniedrigung der Rate im Straw ergab denselben Röhrenstrom-Intensität-Zusammenhang, was in Abb. 5.5 dargestellt ist.

Um trotzdem noch vorhandene Straw-Effekte sicher auszuschließen, wurde eine zweite Messung mit einem unabhängigem Detektor durchgeführt. Zu diesem Zweck wurde ein Dosimeter neben den Straws angebracht. Das Ergebnis dieser Dosimetermessung ist in Abb. 5.6 zu sehen. In Abb. 5.7 ist die Ursache dieses Effektes zu sehen. Auch diese Messung wurde mit dem Dosimeter durchgeführt. Dort ist deutlich zu sehen,

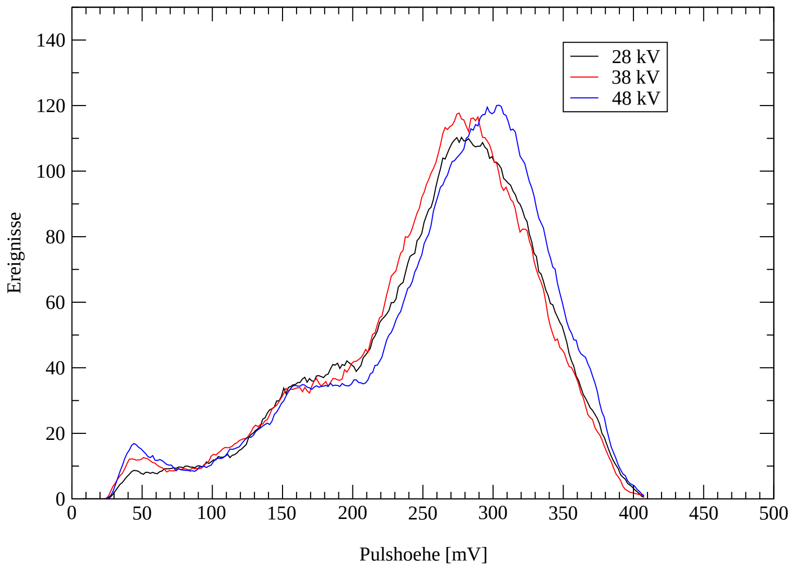


Abbildung 5.2: Röntgenspektren, gemessen bei drei verschiedenen Röhrenspannungen

daß, wenn der Röhrenstrom bei konstanter Spannung von 0.1 mA auf 0.3 mA erhöht wird, die Intensität im Zentralbereich nicht ansteigt, sondern nur der bestrahlte Bereich größer wird. Da die Intensität aber nur an einer Stelle gemessen wurde, erklärt dieses Verhalten des Strahlungskegels das Plateau. Zur Kontrolle wurde dieselbe Messung bei konstantem Strom und verschiedenen Spannungen wiederholt. Wie in Abb. 5.8 zu sehen ist, wird der Strahl bei einer höheren Spannung etwas breiter und intensiver, seine Form ändert sich aber nicht wesentlich.

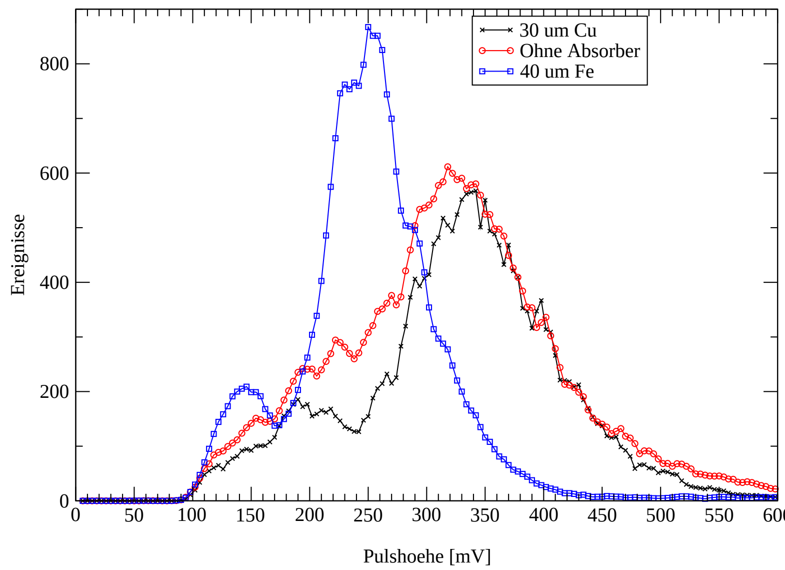


Abbildung 5.3: Röntgenspektren mit 30$\mu$m Kupfer und mit 40$\mu$m Edelstahl vor dem Austrittsfenster

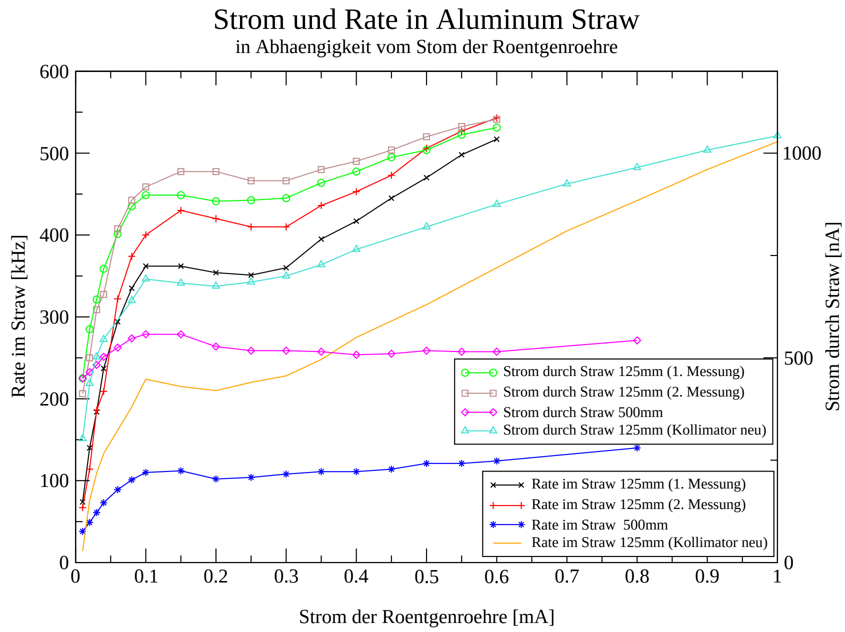


Abbildung 5.4: "Plateaueffekt" bei der Röhrenstromabhängigkeit der Intensität. Die Längenangaben in der Legende bezeichnen den Abstand der Straws zu dem zweiten Kollimator, welcher die Intensität der auf die Straws treffenden Strahlung bestimmt.

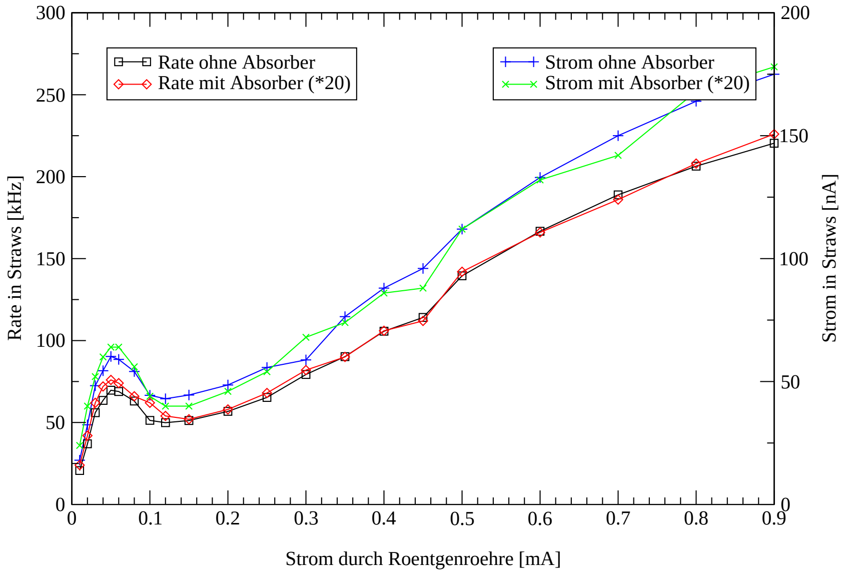


Abbildung 5.5: “Plateaueffekt” bei der Röhrenstromabhängigkeit der Intensität, gemessen bei verschiedenen Strahlenbelastungen des Straws

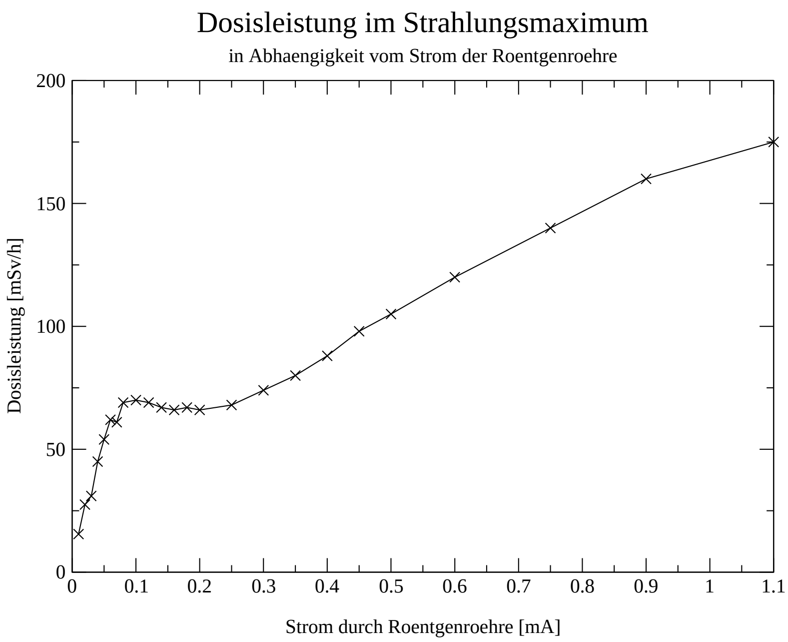


Abbildung 5.6: “Plateaueffekt” bei der Röhrenstromabhängigkeit der Intensität, gemessen mit unabhängigem Dosimeter

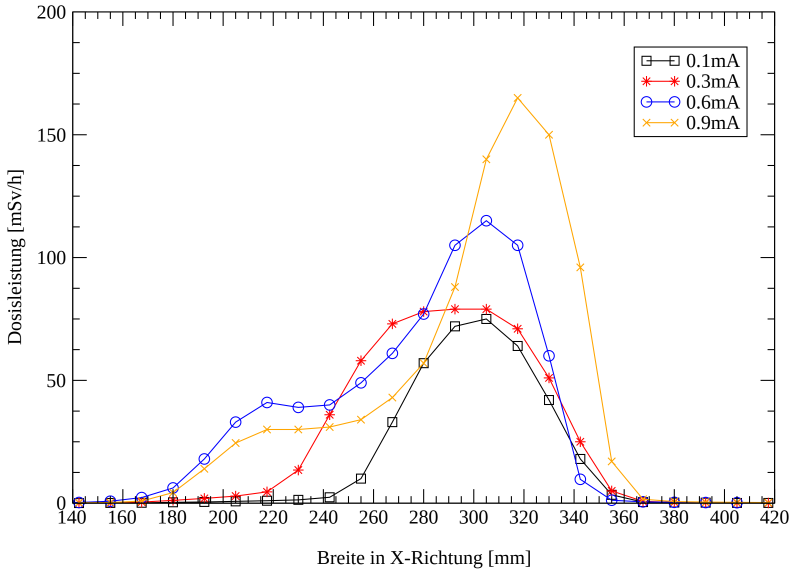


Abbildung 5.7: Horizontales Strahlprofil der Röntgenröhre, gemessen ohne Kollimator 2 bei verschiedenen Röhrenströmen und einer Röhrenspannung von 38 kV

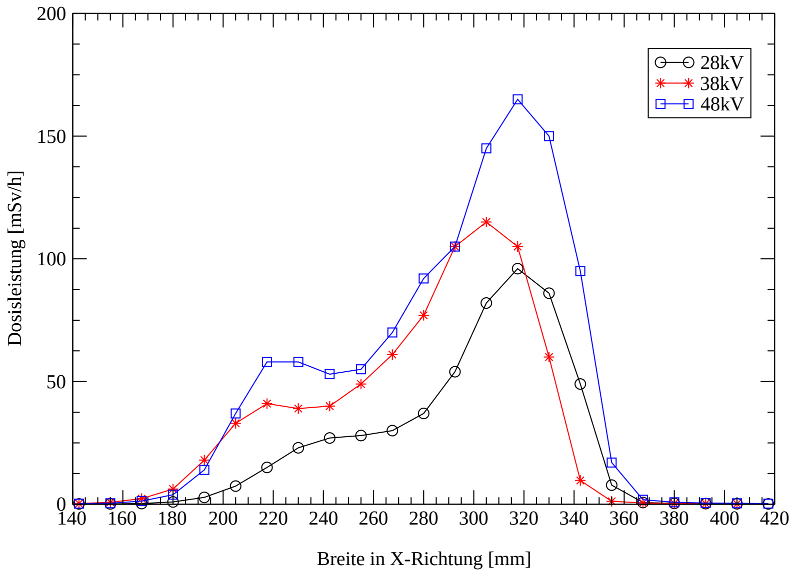


Abbildung 5.8: Horizontales Strahlprofil der Röntgenröhre, gemessen ohne Kollimator 2 bei verschiedenen Röhrenspannungen und einem Röhrenstrom von 600$\mu$A

## 5.2 Messungen zu Straweffekten

Nachdem das Abstrahlungsverhalten der Röntgenröhre verstanden war, konnten Messungen zu den durch die Straws selbst verursachten Effekten in Angriff genommen werden. All diese Messungen wurden mit dem Aluminiumstrawmodul durchgeführt.

### 5.2.1 Aufladungseffekte

Zunächst wurden Aufladungseffekte untersucht. Zu diesem Zweck wurde ein Absorber, der mit einem Elektromagneten schnell in den Strahl gebracht und wieder herausgezogen werden konnte, vor der Röntgenröhre angebracht. Durch die Verwendung dieses Absorbers wurde sichergestellt, daß keine durch das Hochfahren der Röntgenröhre verursachten Einflüsse das Meßergebnis beeinträchtigten. Da die Aufladung nur auf nichtleitenden Flächen im Straw möglich ist, wurde diese hauptsächlich bei Bestrahlung eines Twisters erwartet.
Die im Straw erzeugte Ladung kann sich auf nichtleitenden Oberflächen ansammeln und durch die veränderte Feldgeometrie und -stärke die Gasverstärkung reduzieren, was sich in einer niedrigeren Pulshöhe und einem kleineren Strom durch die Straws abzeichnet. Die Anwesenheit von Wasser im Straw ermöglicht es der Ladung, von eigentlich nichtleitenden Oberflächen abzufließen und verhindert dadurch Aufladungseffekte. Da die mit leitfähigem Kleber gefertigten Straws sehr gasundicht waren, war der Wassergehalt in den Straws recht hoch (750 - 1850 ppm). Daher war es nur einmal bei einem sehr niedrigen Wassergehalt möglich, einen Aufladungseffekt aufzuzeichnen, wie in Abb. 5.9 gezeigt. Im Verlauf der Messung wurde der Absorber mehrmals entfernt und wieder in den Strahl gehalten. Es ist sehr deutlich zu sehen, daß Aufladung und Abfließen der Ladung mit zwei unterschiedlichen Zeitkonstanten stattfinden; die Aufladung in Minuten, das Wiederabfließen in Stunden, da der Strom auch nach einer bestrahlungsfreien Zeit von 12 Minuten nicht wieder angestiegen ist.

### 5.2.2 Raumladungseffekte

Eine weitere Messung bestand darin, zu beobachten, wie sich die Straws unter hohen Strahlungsbelastungen verhalten. Zu diesem Zweck wurde ein Straw mit einem 5mm $\times$ 5mm Kollimator abgedeckt. Da die Steuerung der Röntgenröhre bei geringer Intensität nur sehr ungenau möglich war, wurde die Strahlenbelastung auch durch den Abstand der Straws vom Kollimator gesteuert. Da sich bei einem größerem Abstand aber auch der Strahl ausdehnte, mußte die erhaltene Rate auf die Entfernung korrigiert werden. Zu diesem Zweck wurde das Strahlprofil in mehreren Abständen bestimmt und auf die übrigen extrapoliert. Diese Messung ist in Abb. 5.10 zu sehen.

Verglichen wurde die Lage des Kupferpeaks im Spektrum der Röntgenröhre bei steigender Strahlenbelastung und drei verschiedenen Spannungen; das Ergebnis ist in Abb. 5.11 dargestellt. Dort ist deutlich zu sehen, daß die Kurve umso früher abknickt, je höher die Betriebsspannung der Straws ist. Dieses Abknicken der Kurve, was einer

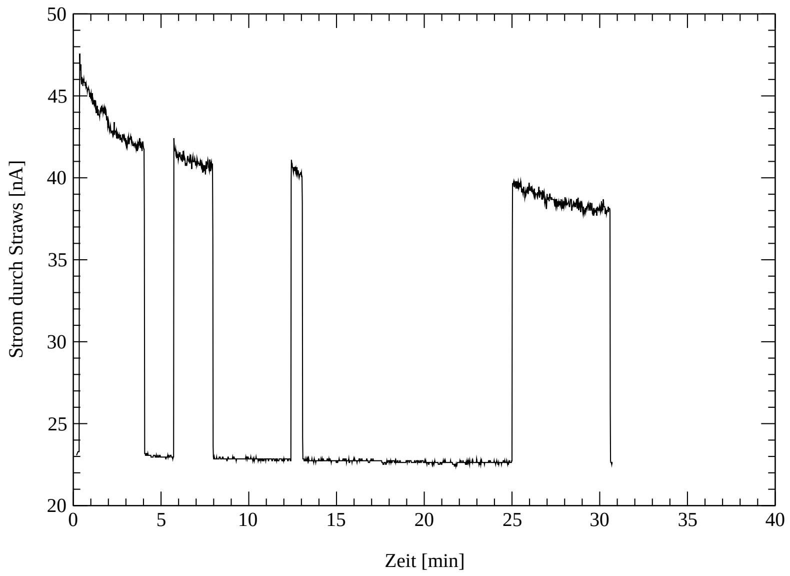


Abbildung 5.9: Zeitlicher Verlauf des beobachteten Aufladungseffekts, gemessen bei Bestrahlung des Twisters. Aufgetragen ist der Strom durch die Straws gegen die Zeit in Minuten.

Verringerung der gemessenen Pulshöhen entspricht, wird durch eine zu hohe Raumladung im Straw verursacht. Diese Raumladung erniedrigt die elektrische Feldstärke in Anodennähe und damit die Gasverstärkung und die resultierenden Pulshöhen. Um sicher zu stellen, daß nicht Elektronikeffekte wie eine Sättigung des Ratenmessers die Ursache sind, multipliziert man die Rate pro Länge mit der Gasverstärkung bei der eingestellten Strawspannung, um eine Größe zu erhalten, die zu der im Straw vorhandenen Raumladungsdichte proportional ist. Diese Auftragung ist in Abb. 5.12 gezeigt. Wie aus der Abbildung zu entnehmen ist, knicken nun alle drei Kurven an demselben Punkt ab, ein Beweis dafür, daß die Reduzierung der Feldstärke die Ursache ist.
Dieser Punkt liegt bei $650 \pm 50$MHz/cm, was bei einer Betriebsspannung von 1550V einer Rate von $15.1 \pm 1.2$kHz/cm Röntgenquanten, und damit einer Rate von $151 \pm 12$kHz/cm minimal ionisierenden Teilchen entspricht (unter der Annahme, daß die Primärionisation von MIP's 1/10 der von Röntgenquanten beträgt).
Alle diesen Rechnungen zugrundeliegenden Annahmen über die Gasverstärkung in $Ar/CO_2/CF_4$ im Verhältnis 75/10/15 basieren auf einer Messung von Raimund Ruschmann [Rus01], die in Abb. 5.13 dargestellt ist.

Dieses Ergebnis ist vergleichbar mit einer Messung der ATLAS-Kollaboration, die in dem Technical Design Report des Inner Trackers [ATL97] eine Grenze von ca. 200 kHz/cm angibt, allerdings gemessen in einer Xenon-Gasmischung mit 4mm dicken Straws bei einer Gasverstärkung von 20000.
Die erwartete Rate in den heißesten Regionen des LHC-b Outer Trackers liegt bei ca. 150 kHz/cm, also gerade an der Grenze der Region maximaler Gasverstärkung. Dies erschwerte die folgenden Alterungstests, da eine zeitliche Beschleunigung, und damit

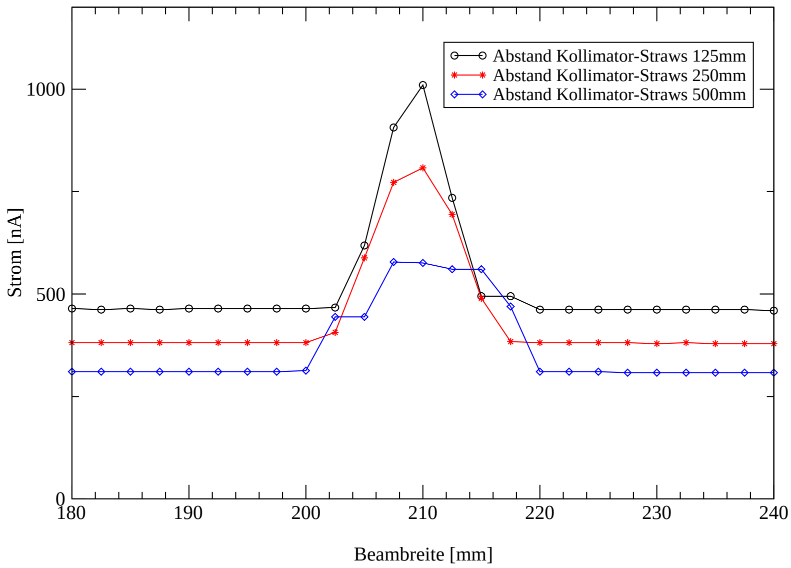


Abbildung 5.10: Horizontales Strahlprofil der Röntgenröhre, gemessen mit Kollimator 2 bei verschiedenen Abständen von Straws und Kollimator 2

eine Erhöhung der Rate sofort die Grenze zu zu hoher Raumladungsdichte überschritt.

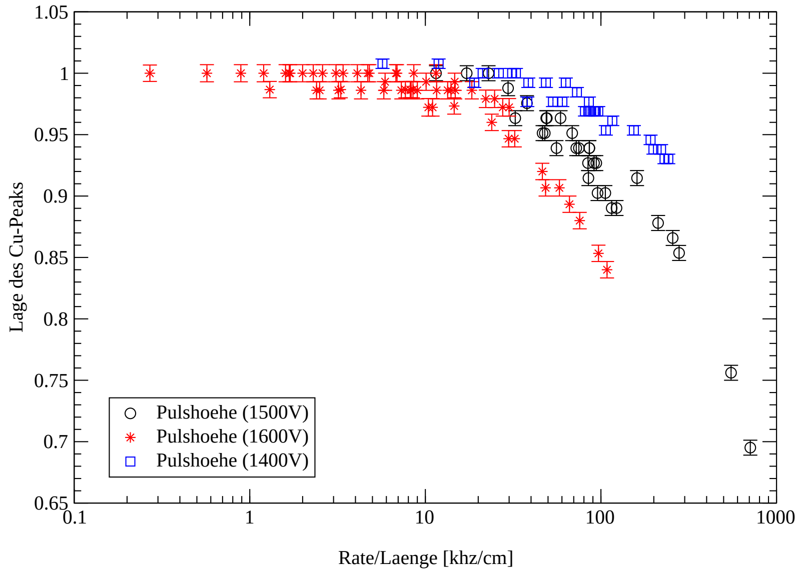


Abbildung 5.11: Lage des Kupferpeaks im Spektrum der Röntgenröhre, normiert auf die Position bei kleinen Raten in Abhängigkeit von der Rate pro cm

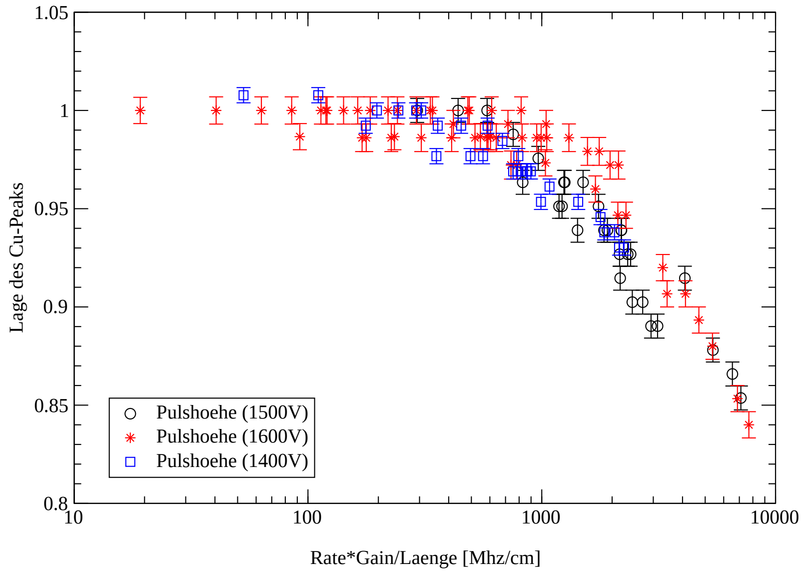


Abbildung 5.12: Lage des Kupferpeaks im Spektrum der Röntgenröhre, normiert auf die Position bei kleinen Raten in Abhängigkeit von der Rate pro cm, multipliziert mit der Gasverstärkung bei der eingestellten Strawspannung

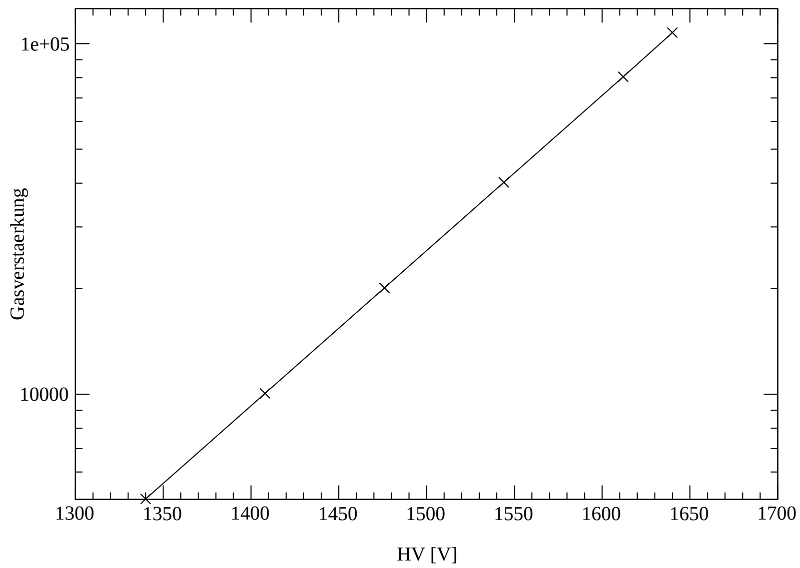


Abbildung 5.13: Gasverstärkung in $Ar/CO_2/CF_4$ im Verhältnis 75/10/15 in Abhängigkeit von der Strawspannung

## 5.3 Erste Alterungstests

Für die ersten Alterungstests wurde ein 2cm × 4cm großer Kollimator verwendet, um 4 Straws auf einer Länge von 6 cm zu bestrahlen. Die durchschnittliche Rate betrug ca. 200 kHz/cm, was zusammen mit der zehnfachen Primärionisation der Röntgenstrahlen einer Beschleunigung um einen Faktor von 20 entspricht. Jeden Tag wurden vier Pulshöhenspektren aufgenommen, zum einen mit der Röntgenröhre bei niedrigen (< 20 kHz/cm) Raten, zum anderen mit einer Fe-55-Quelle, jeweils eines in der bestrahlten und eines in einer unbestrahlten Region, um Veränderungen durch Luftdruck, Temperatur, Änderung der Gaszusammensetzung, Wassergehalt oder andere unbekannte Faktoren auszuschließen. Ein Vergleich der an einem Tag gemessenen Röntgenspektren ist in Abb. 5.14 zusehen, die Entwicklung des Röntgenspektrums im bestrahlten Bereich in Abb. 5.15. Bei dem zweiten Graph wurde die Lage des Maximums mit den unbestrahlten Spektren normiert.

Die tatsächliche Bestrahlung entsprach einer Ladungsdeposition von ca. $22\frac{\mathrm{mC}}{\mathrm{cm}\times\mathrm{Tag}}$,

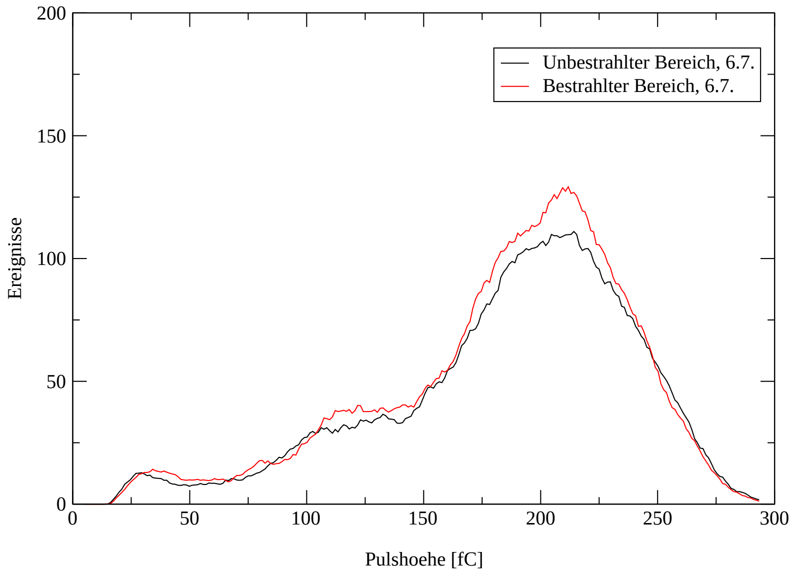


Abbildung 5.14: Pulshöhenspektren der Röntgenröhre im bestrahlten und unbestrahlten Bereich, aufgenommen am 6.7.2001

womit ein LHC-b-Jahr (100 mC/cm) in 5 Tagen simuliert wurde. Die Ergebnisse der Messung mit Röntgenstrahlen sind in Tabelle 5.1 zusammengefaßt. Aufgeführt werden Datum der Messung, gesammelte Ladung und Position, Standardabweichung und relative Breite des Maximums des Röntgenspektrums jeweils im bestrahlten und unbestrahlten Bereich. Insgesamt wurde eine Ladung von 888 mC/cm gesammelt.

Eine eventuelle Alterung würde sich in einer Verschlechterung der Energieauflösung und in einer verringerten Pulshöhe, also einem kleineren Verhältnis der Positionen des Maximums des Röntgenspektrums im bestrahlten und unbestrahlten Bereich widerspiegeln.

| Datum | Ladung | bestrahlt | | | unbestrahlt | | | be/unbe |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | [mC/cm] | $\mu$ [mV] | $\sigma$ [mV] | $\sigma/\mu$ [%] | $\mu$ [mV] | $\sigma$ [mV] | $\sigma/\mu$ [%] | [%] |
| 31.5. | 25 | 259.7 | 47.5 | 18.3 | 264.7 | 47.0 | 17.8 | 98.1 |
| 1.6. | 49 | 239.7 | 46.7 | 18.2 | 245.7 | 44.2 | 18.0 | 97.6 |
| 6.6. | 88 | 257.5 | 47.8 | 18.5 | 265.0 | 48.8 | 18.4 | 97.2 |
| 7.6. | 110 | 243.7 | 45.3 | 18.6 | 248.5 | 47.2 | 19.0 | 98.1 |
| 8.6. | 134 | 256.5 | 48.2 | 18.8 | 263.9 | 50.0 | 19.0 | 97.2 |
| 12.6. | 156 | 235.9 | 45.2 | 19.2 | 244.5 | 47.3 | 19.4 | 96.5 |
| 13.6. | 181 | 246.9 | 45.5 | 18.4 | 248.0 | 48.9 | 19.7 | 99.5 |
| 15.6. | 233 | 252.7 | 46.3 | 18.3 | 257.9 | 46.7 | 18.1 | 98.0 |
| 18.6. | 313 | 256.4 | 48.3 | 18.9 | 262.5 | 47.3 | 18.0 | 97.7 |
| 19.6. | 338 | 228.5 | 42.3 | 18.5 | 232.7 | 46.2 | 19.8 | 98.2 |
| 20.6. | 361 | 236.2 | 45.0 | 19.1 | 242.2 | 46.3 | 19.3 | 97.5 |
| 21.6. | 387 | 257.5 | 48.7 | 18.9 | 262.2 | 47.5 | 18.1 | 98.2 |
| 22.6. | 409 | 253.2 | 47.2 | 18.6 | 262.7 | 48.7 | 18.5 | 96.4 |
| 25.6. | 486 | 240.2 | 46.7 | 19.4 | 249.7 | 45.8 | 18.4 | 96.2 |
| 26.6. | 511 | 254.9 | 46.8 | 18.4 | 254.9 | 46.0 | 18.1 | 100.0 |
| 27.6. | 536 | 277.4 | 51.0 | 18.4 | 281.7 | 52.8 | 18.8 | 98.4 |
| 28.6. | 552 | 263.9 | 47.0 | 17.8 | 267.5 | 49.7 | 18.6 | 98.6 |
| 2.7. | 661 | 234.0 | 45.8 | 19.6 | 229.9 | 45.0 | 19.6 | 101.8 |
| 3.7. | 684 | 253.7 | 45.7 | 18.0 | 255.0 | 47.7 | 18.7 | 99.5 |
| 4.7. | 710 | 280.4 | 48.2 | 17.7 | 281.2 | 46.2 | 16.4 | 99.7 |
| 5.7. | 735 | 284.7 | 51.3 | 18.0 | 282.9 | 51.7 | 18.3 | 100.6 |
| 6.7. | 761 | 285.6 | 48.9 | 17.1 | 286.2 | 52.4 | 18.3 | 99.8 |
| 9.7. | 842 | 281.9 | 49.1 | 17.4 | 281.4 | 49.1 | 17.4 | 100.2 |
| 10.7. | 867 | 280.5 | 46.7 | 16.6 | 281.0 | 45.4 | 16.2 | 99.8 |
| 11.7. | 888 | 286.5 | 47.9 | 16.7 | 279.7 | 50.4 | 18.0 | 102.4 |

Tabelle 5.1: Meßdaten der Messung mit der Röntgenquelle. $\mu$ entspricht der Lage des Maximums des Röntgenspektrums, $\sigma$ der Standardabweichung, jeweils im bestrahlten und im unbestrahlten Bereich. be/unbe gibt das Verhältnis der Maxima im bestrahlten und unbestrahlten Bereich.

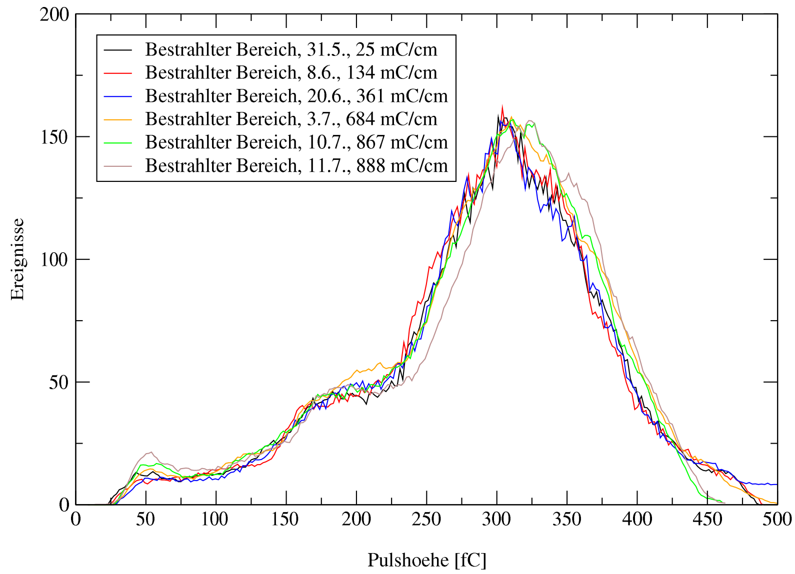


Abbildung 5.15: zeitliche Entwicklung der Pulshöhenspektren der Röntgenröhre im bestrahlten Bereich; die Lage der Maxima ist mit den Spektren im unbestrahlten Bereich korrigiert

In Abb. 5.16 ist das Verhältnis der Positionen der Maxima gegen die angesammelte Ladung aufgetragen. Die Fehler stammen aus einer Messung, bei der das Maximum des Röntgenspektrums unter identischen Bedingungen mehrmals gemessen wurde. Dabei stellte sich heraus, daß eine kleine Veränderung der Intensität, bedingt durch unvermeidbare Ungenauigkeiten beim Einstellen eines Wertes, einen Einfluß auf die Lage hatte. Der durch diese Veränderung bedingte Fehler beträgt 1.8% . Da die in Abb. 5.16 aufgetragenen Meßwerte aber Verhältnisse von zwei bei gleichen Röhreneinstellungen gemessenen Werten sind, ist ihr Fehler kleiner: 0.9% . Wie oben gesagt würden Alterungseffekte ein Absinken dieses Verhältnisses bewirken, dies ist jedoch nicht zu erkennen.

Die Ergebnisse der Messung mit einer Eisenquelle sind in Tabelle 5.2 dargestellt, wieder mit Position, Standardabweichung und relative Breite des Maximums des Eisenspektrums.

Die Umweltbedingungen der beiden Messungen sind in Tabelle 5.3 dargestellt. Diese sind Luftdruck, Temperatur und Wassergehalt des Zählgases.

Die zeitliche Entwicklung der in Tab. 5.3 gegebenen Werte ist in Abb. 5.17 zu sehen.

Um die Werte der Pulshöhe mit Druck und Temperatur in Zusammenhang zu bringen kommt die Diethornformel [Blu93] zur Anwendung:

$$ln\, G = \frac{ln2}{ln(b/a)}\frac{V}{\Delta V} ln \frac{V}{ln(b/a) a \mathrm{E}_{\mathrm{min}}(\rho_0)(\rho/\rho_0)} \tag{5.1}$$

| Datum | Ladung | bestrahlt | | | unbestrahlt | | | be/unbe |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | [mC/cm] | $\mu[mV]$ | $\sigma$ [mV] | $\sigma/\mu$ [%] | $\mu$ [mV] | $\sigma$ [mV] | $\sigma/\mu$ [%] | [%] |
| 1.6. | 49 | 168.4 | 23.2 | 13.8 | 168.9 | 23.4 | 13.9 | 99.7 |
| 6.6. | 88 | 182.1 | 25.5 | 14.0 | 181.5 | 25.1 | 13.8 | 100.3 |
| 7.6. | 110 | 178.7 | 24.7 | 13.8 | 178.3 | 24.7 | 14.2 | 100.2 |
| 8.6. | 134 | 179.4 | 24.5 | 13.7 | 179.2 | 25.6 | 14.3 | 100.1 |
| 12.6. | 156 | 165.6 | 23.1 | 13.9 | 174.6 | 23.9 | 13.7 | 94.8 |
| 13.6. | 181 | 171.8 | 24.2 | 14.1 | 176.9 | 24.5 | 13.8 | 98.4 |
| 15.6. | 233 | 176.3 | 24.7 | 14.0 | 181.9 | 25.4 | 14.0 | 96.9 |
| 18.6. | 313 | 174.4 | 24.6 | 14.1 | 178.5 | 24.6 | 13.8 | 97.7 |
| 19.6. | 338 | 160.1 | 22.5 | 14.1 | 163.7 | 23.1 | 14.1 | 97.8 |
| 20.6. | 361 | 162.6 | 22.2 | 13.7 | 171.0 | 22.7 | 13.3 | 95.1 |
| 21.6. | 387 | 176.0 | 24.9 | 14.1 | 178.3 | 25.2 | 14.1 | 98.7 |
| 22.6. | 409 | 176.6 | 24.4 | 13.8 | 180.5 | 24.9 | 13.8 | 97.8 |
| 25.6. | 486 | 174.9 | 25.1 | 14.4 | 173.2 | 24.0 | 13.9 | 101.0 |
| 26.6. | 511 | 174.3 | 24.4 | 14.0 | 178.4 | 24.5 | 13.7 | 97.7 |
| 27.6. | 536 | 183.8 | 24.8 | 13.5 | 190.9 | 27.3 | 14.3 | 96.3 |
| 28.6. | 552 | 180.1 | 24.9 | 13.8 | 180.7 | 26.1 | 14.4 | 99.7 |
| 2.7. | 661 | 162.3 | 22.4 | 13.8 | 158.2 | 22.7 | 14.3 | 102.6 |
| 3.7. | 684 | 176.4 | 24.5 | 13.9 | 176.3 | 24.4 | 13.8 | 100.1 |
| 4.7. | 710 | 192.9 | 27.1 | 14.0 | 189.7 | 27.2 | 14.3 | 101.7 |
| 5.7. | 735 | 192.8 | 26.7 | 13.8 | 191.8 | 28.4 | 14.8 | 100.5 |
| 6.7. | 761 | 193.8 | 26.6 | 13.7 | 195.1 | 28.8 | 14.8 | 99.3 |
| 9.7. | 842 | 191.4 | 28.2 | 14.7 | 190.4 | 26.5 | 13.9 | 100.5 |
| 10.7. | 867 | 192.2 | 25.7 | 13.4 | 186.4 | 27.3 | 14.6 | 103.1 |
| 11.7. | 888 | 190.7 | 27.8 | 14.6 | 188.5 | 27.0 | 14.3 | 101.2 |

Tabelle 5.2: Meßdaten der Messung mit der Eisenquelle. Ladung ist die auf dem Draht pro Länge gesammelte Ladung, $\mu$ entspricht der Lage des Maximums des Eisenspektrums, $\sigma$ der Standardabweichung, jeweils im bestrahlten und im unbestrahlten Bereich. be/unbe gibt das Verhältnis der Maxima im bestrahlten und unbestrahlten Bereich.

| Datum | Ladung [mC/cm] | Druck [mbar] | Temperatur [°C] | Wassergehalt [ppm] |
|---|---|---|---|---|
| 31.5. | 25 | 940 | 24.0 | 990 |
| 1.6. | 49 | 960 | 24.8 | 850 |
| 6.6. | 88 | 956 | 25.1 | 910 |
| 7.6. | 110 | 953 | 25.2 | 1170 |
| 8.6. | 134 | 955 | 25.2 | 1120 |
| 12.6. | 156 | 975 | 25.6 | 1110 |
| 13.6. | 181 | 970 | 25.4 | 1080 |
| 15.6. | 233 | 967 | 25.8 | 1120 |
| 18.6. | 313 | 965 | 26.0 | 1310 |
| 19.6. | 338 | 978 | 26.0 | 1260 |
| 20.6. | 361 | 983 | 25.9 | 1120 |
| 21.6. | 387 | 972 | 26.2 | 1150 |
| 22.6. | 409 | 976 | 26.3 | 1150 |
| 25.6. | 486 | 986 | 26.8 | 1170 |
| 26.6. | 511 | 979 | 26.8 | 1240 |
| 27.6. | 536 | 975 | 27.0 | 1170 |
| 28.6. | 552 | 964 | 26.8 | 1480 |
| 2.7. | 661 | 980 | 27.2 | 1425 |
| 3.7. | 684 | 797 | 27.3 | 1240 |
| 4.7. | 710 | 979 | 27.5 | 1120 |
| 5.7. | 735 | 976 | 27.6 | 1150 |
| 6.7. | 761 | 977 | 27.8 | 1150 |
| 9.7. | 842 | 973 | 28.1 | 1260 |
| 10.7. | 867 | 977 | 28.0 | 1120 |
| 11.7. | 888 | 972 | 28.1 | 1220 |

Tabelle 5.3: Umweltbedingungen der Alterungsmessung

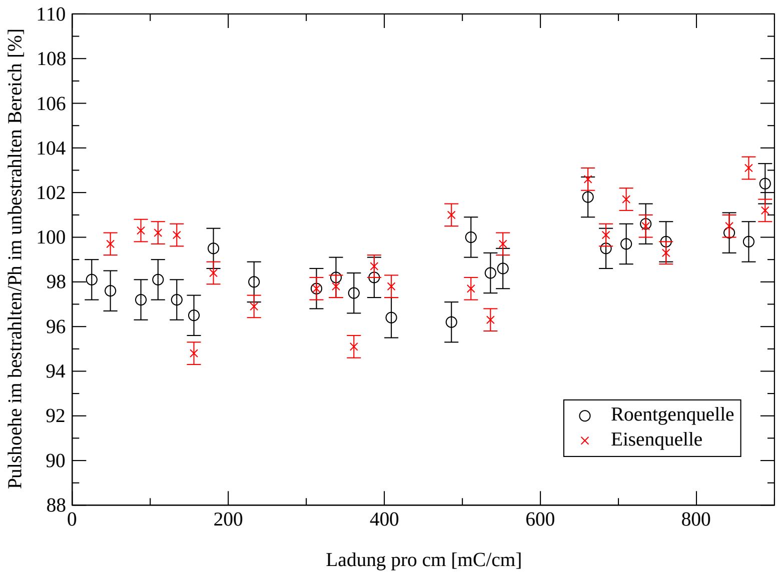


Abbildung 5.16: Pulshöehenverhältnis im bestrahlten und unbestrahlten Bereich in Abhängigkeit von der auf dem Draht gesammelten Ladung pro cm

| | |
|---|---|
| $G$ | Gasverstärkung |
| $a$ | Radius des Zähldrahtes |
| $b$ | Strawradius |
| $e\Delta V$ | Die zur Erzeugung eines weiteren Elektrons durchschnittlich nötige Energie |
| $V$ | Am Draht anliegende Spannung |
| $E_{min}$ | Minimales, zur Gasverstärkung nötiges elektrisches Feld |
| $\rho$ | Dichte des Zählgases |
| $\rho_0$ | Dichte des Zählgases bei Normalbedingungen |

Da $\rho \sim T/p$ ist, sollte eine Auftragung von

$$y = \frac{ln\,G\,ln(b/a)}{V} \text{ gegen } x = ln\frac{V\,p\,T_0}{ln(b/a)a\,T\,p_0} \tag{5.2}$$

eine Gerade ergeben. Zur Berechnung der Gasverstärkung werden die täglich durchgeführten Strom- und Ratenmessungen verwendet. Diese Auftragung ist in Abb. 5.18 dargestellt. Die angegebenen Fehlerbalken ergeben sich aus dem Meßfehler bei der Strommessung. Ein linearer Zusammenhang ist zu erkennen.

Aus der an die Punkte gefitteten Gerade können auch die beiden Parameter $\Delta V$ und $E_{min}$ des verwendeten Gases, Ar/$CH_4$/$CF_4$ 75/10/15, ermittelt werden. Diese ergeben sich zu

$$\Delta\text{V} = 58.5 \text{ V} \tag{5.3}$$
$$\text{E}_{min} = 11.3 \text{ kV/cm} \tag{5.4}$$

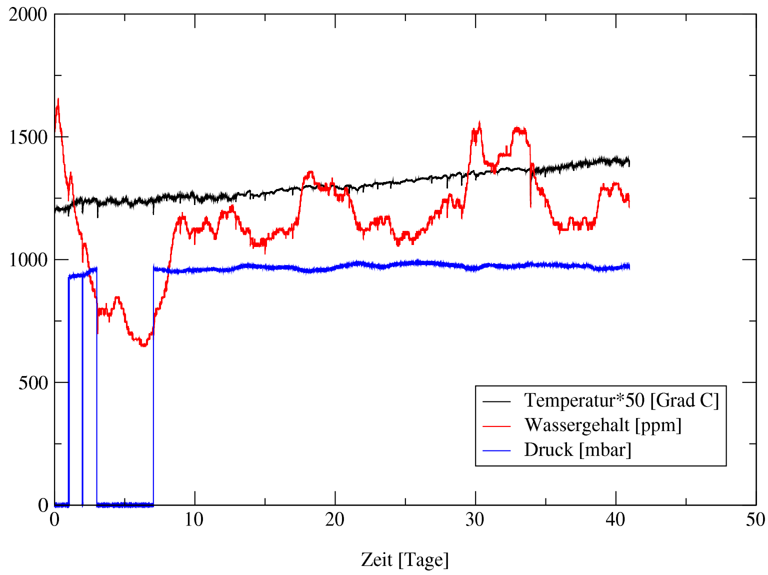


Abbildung 5.17: Zeitliche Entwicklung der Umweltbedingungen (Temperatur, Wassergehalt und Druck) bei der Alterungsmessung

| Eisenquelle in $Ar/CH_4/CF_4$ | | | |
|---|---|---|---|
| Plateaubeginn [V] | Plateauende [V] | Plateaulänge [V] | Plateaumitte [V] |
| 1530 | 1850 | 320 | 1690 |

Tabelle 5.4: Ergebnisse der Plateaumessungen mit einer Eisenquelle in $Ar/CH_4/CF_4$. Hierbei sind Plateaubeginn und -ende definiert als 90% bzw. 110% der Zählrate in der Mitte des Plateaus.

. Zum Vergleich sind die Parameter anderer Gasmischungen in [Blu93] in Tabelle 4.2 zu finden.

Abschließend wurden noch mehrere Pulshöhenmessungen entlang eines Straws durchgeführt, um sicherzustellen, daß keine Veränderungen der Gasverstärkungen auftraten. Diese Messungen sind in Abb. 5.19 zu sehen. Innerhalb der Messgenauigkeit (ca. 0.5 %) liegen alle Maxima an derselben Stelle.

Um sicherzugehen, daß auftretende Alterungseffekte auch erkannt werden, wird für eine Kontrollmessung ein Gas verwendet, welches Alterung begünstigt: $Ar/CH_4/CF_4$ 75/10/15. Die Plateaukurve für dieses Gas, gemessen mit einer Eisenquelle, ist in Abb. 5.20 zu sehen. Die am benutzten Diskriminator eingestellte Schwelle betrug 55 mV.

Leider trat nach Ende der oben beschriebenen Alterungsmessung wieder ein Defekt in der Röntgenröhre auf, welcher verhinderte, daß die Kontrollmessung noch innerhalb dieser Arbeit durchgeführt werden konnte.

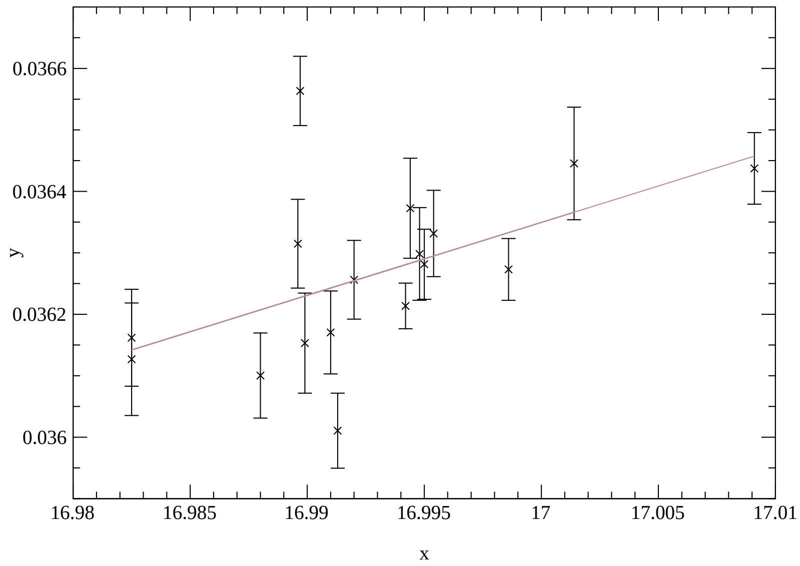


Abbildung 5.18: Druck- und Temperaturabhängigkeit der Gasverstärkung; die Achsenbeschriftungen x und y sind in Gleichung 5.2 erläutert

## 5.4 Zusammenfassung

Nach anfänglichen Problemen, die Abstrahlcharakteristik der Röntgenröhre zu verstehen, war es möglich, zwischen Einflüssen der Quelle und Straweffekten zu unterscheiden. Zu der Frage, ob in Twisternähe Aufladung stattfindet, konnte leider keine definitive Antwort gegeben werden, da aufgrund eines Produktionsfehlers die Straws nicht gasdicht waren und der Wassergehalt im Gas zu hoch war. Es wurde bei einem niedrigen Feuchtigkeitsgehalt eine Beobachtung gemacht, die wahrscheinlich durch Aufladung verursacht wurde; leider war diese Messung nicht reproduzierbar.
Die Gasverstärkung der Straws wird durch Raumladungseffekte, verursacht durch zu hohe Teilchenraten, verringert. Die Grenze, ab der diese Verringerung eintritt, liegt bei $151 \pm 12$kHz/cm, was in etwa der erwarteten Rate in der am stärksten bestrahlten Region der äußeren Spurkammer enspricht.
Während des Alterungstests wurde eine Ladung von 888 mC/cm gesammelt, was in etwa einer Laufzeit am LHC-b von 9 Jahren entspricht. Im Laufe dieser Messung war unter Vorbehalt des hohen Wassergehaltes weder eine Reduzierung der gemessenen Pulshöhen noch eine Verschlechterung der Energieauflösung des Detektors zu beobachten. Eine Kontrollmessung, die Alterung durch die Verwendung von Methan im Zählgas herbeiführen sollte, konnte aufgrund eines Defektes der Röntgenröhre nicht mehr in dieser Arbeit aufgeführt werden.

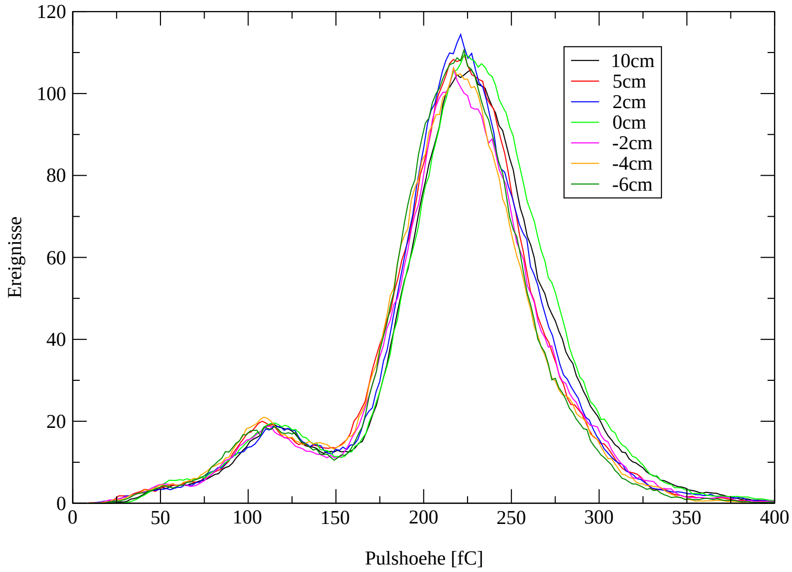


Abbildung 5.19: Pulshöhenspektra nach 888 mC/cm gesammelter Ladung entlang eines Straws. Die bestrahlte Zone lag bei ±3 cm.

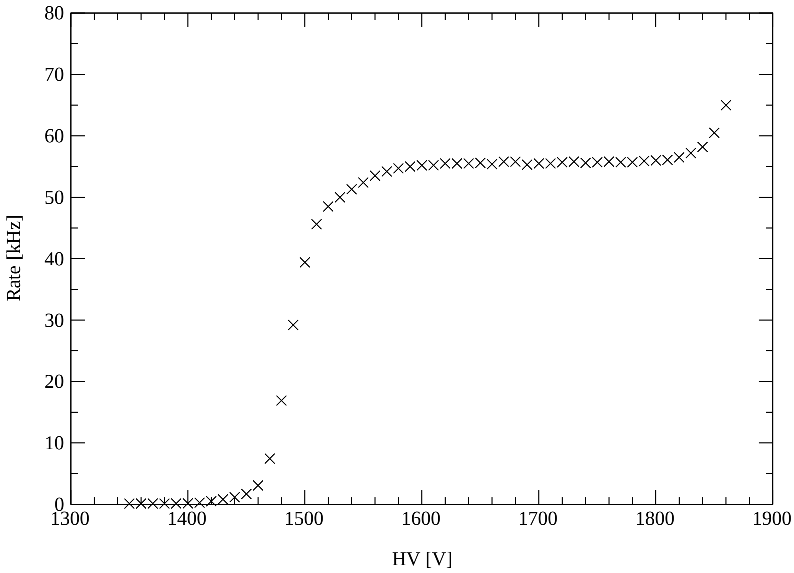


Abbildung 5.20: Plateaukurve von Ar/$CH_4$/$CF_4$ 75/10/15 gemessen mittels einer Eisenquelle bei einer Diskriminatorschwelle von 55 mV

# Abbildungsverzeichnis

# Literaturverzeichnis


[ALI95] ALICE Collaboration:
*ALICE : technical proposal for a large ion collider experiment at the CERN LHC*
CERN **CERN-LHCC-95-71 ; LHCC-P-3** (1995)

[ATL94] ATLAS Collaboration:
*ATLAS : technical proposal for a general-purpose pp experiment at the Large Hadron Collider at CERN*
CERN **LHCC-94-43 ; LHCC-P-2** (1994)

[ATL97] ATLAS Inner Detector Community:
*ATLAS Inner Detector Technical Design Report*
CERN **LHCC/97-17** (1997) 636

[Bev96] B. Bevensee et al:
*A Amplifier Shaper Discriminator with Baseline Restoration for the ATLAS Transition Radiation Tracker*
IEEE Transaction on Nuclear Science, vol. **43**, 1996

[Blu93] W. Blum, L. Rolandi:
*Particle Detection with Drift Chambers*
Springer Verlag Berlin Heidelberg 1993

[Cab63] N. Cabibbo:
Phys. Rev. Lett. **10** (1963) 531

[Chr64] J.H. Christenson, J.W. Cronin, V.L. Fitch, R. Turlay:
Phys. Ref. Lett. **13** (1964) 138

[CMS94] CMS Collaboration:
*Technical proposal*
CERN **LHCC-94-38 ; LHCC-P-1** (1994)

[Gou01] Iouri Gouz:
*Persönliche Mitteilung* (2001)

[Hoe99] Kerstin Höpfner:
*Status Repost: HERA-b Outer Tracker Chambers Based on Straw Tubes* DESY **Hera-B 99-182** (1999)

[Kad90] John A. Kadyk:
*Wire chamber aging*
Nucl. Instr. and Meth. **A300** (1991) 436-479

[Kle87] K. Kleinknecht:
*Detektoren für Teilchenstrahlung*
B.G. Teubner, Stuttgart (1987)

[Lan65] L. Landau:
J. Physics (USSR) **8** (1944) 201
Also: Collected Papers, D. ter Haar (Ed.), Pergamon Press, Oxford (1965)

[LHC98] LHCb Collaboration:
*LHCb : Technical Proposal*
CERN **LHCC-98-004 ; LHCC-P-4** (1998)

[Moy55] J.E. Moyal:
*Theory of Ionization Fluctuations*
Phil. Mag. **46** (1955) 263

[Pov99] Povh, Rith, Scholz, Zetsche:
*Teilchen und Kerne*
Springer Verlag Berlin Heidelberg (1999)

[Rus01] Raimund Ruschmann:
Diplomarbeit in Vorbereitung, Okt. 2001

[Sau77] F. Sauli:
*Principles of Operation of Multiwire Proportional and Drift Chambers*
CERN **77-09** (1977)

[Wol45] L. Wolfenstein:
Phys. Ref. Lett. **51** (1983) 1945

# Vielen Dank an ...

- Herrn Prof. Dr. F. Eisele für das abwechslungsreiche und interessante Thema und die gute Betreuung während der Arbeit
- Herrn Dr. H.-B. Dreis für die Hilfestellung und Unterstützung während des Wintersemesters
- Herrn Dr. S. Bachmann für die Betreuung während des Sommersemesters
- Herrn M. Walter für die Zusammenarbeit und das Korrekturlesen
- Der mechanischen und der elektrischen Werkstatt des Physikalischen Instituts für die Ausführung der verschiedenen Aufträge beim Moduldesign
- Meinen Eltern, ohne deren Unterstützung diese Arbeit nie zustandegekommen wäre
- Salma Latiri für die moralische und seelische Unterstützung, die rege Anteilnahme an allen Problemen und das wiederholte Durchsehen dieser Arbeit

**Erklärung:**

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

Heidelberg, den ................ ..................................

Jens Kessler